

**Курбанов Рашид Курбанович**

**РАЗВИТИЕ БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ**

**Специальности**

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса  
(технические науки)

5.6.6. История науки и техники (технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ)

**Научный консультант:** доктор технических наук, доцент, член-корреспондент РАН, **Ценч Юлия Сергеевна**, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», лаборатория почвообрабатывающих и мелиоративных машин, главный научный сотрудник

**Официальные оппоненты:** **Ерохин Михаил Никитьевич**, доктор технических наук, профессор, академик РАН, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет –МСХА имени К.А. Тимирязева», кафедра сопротивление материалов и детали машин, профессор

**Рудой Дмитрий Владимирович**, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), факультет «Агропромышленный», декан

**Труфляк Евгений Владимирович**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», кафедра эксплуатации и технического сервиса, заведующий

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений» (ФГБНУ ВИЗР)

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2026 г. в \_\_\_\_\_ часов на заседании Диссертационного совета 24.1.247.03, созданного на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), по адресу: 109428, РФ, г. Москва, ул. 1-й Институтский проезд, дом 5, тел/факс: 8(499)171-43-49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и на сайте <http://vim.ru>.

Автореферат размещен на сайте Министерства науки и высшего образования Российской Федерации: <https://vak.minobrnauki.gov.ru> « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук,  
член-корреспондент РАН

Сибирёв Алексей Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Переход к точному земледелию, предполагающий реализацию дифференцированных операций, основывается на оперативном получении достоверных данных о состоянии сельскохозяйственных объектов. Именно беспилотные летательные аппараты (БПЛА) становятся ключевым технологическим решением этой проблемы. Они позволяют сканировать большие площади и собирать данные с высокой детализацией. Таким образом, использование БПЛА для мониторинга сельскохозяйственных угодий не просто эволюционное улучшение, а качественный скачок, необходимый для реализации технологий точного земледелия. Однако его реализация затруднительна без разработки научно-методической базы, определяющей начальные условия и параметры для эффективного применения беспилотников. В связи с этим необходим глубокий ретроспективный анализ БПЛА, который позволит определить и выработать наиболее эффективные технические и технологические решения для агропромышленного комплекса (АПК).

Первые БПЛА появились еще в 1917 году, однако аэрофотосъемка сельскохозяйственных культур с мультиспектральной камерой стала возможна с 2013 года. Развитие технологий БПЛА позволило им трансформироваться в высокотехнологичные, автоматизированные решения на базе беспилотных авиационных систем (БАС). Их применение закреплено на государственном уровне в таких документах, как: Стратегия развития беспилотной авиации Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2035 года (распоряжение Правительства РФ №1630-р от 21.06.2023); Стратегия научно-технического развития Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации №145 от 28.04.2024); Стратегическое направление цифровой трансформации агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов России на период 2030 года (распоряжение Правительства Российской Федерации №993-р от 12 апреля 2020 г.).

Несмотря на преимущества, широкое внедрение БАС в АПК сдерживается рядом нерешенных проблем, определяющих научную и практическую актуальность исследований в данной области. Производство отечественных БАС на 70% зависит от зарубежной элементной базы, что создает риски для дальнейшего технологического развития. Эксплуатацию БАС затрудняет отсутствие комплексных решений для сельскохозяйственного сектора, специализированных подвесов для установки мультиспектральных камер, ограниченные функциональные возможности программного обеспечения для создания полётных заданий, фотограмметрической обработки данных аэросъемки и анализа. Методы анализа данных аэрофотосъемки нуждаются в совершенствовании или создании новых подходов для автоматизированного анализа и создания рекомендаций для агрономов и селекционеров. БАС способны полностью трансформировать методы возделывания сельскохозяйственных культур в рамках стратегии цифровой трансформации сельского хозяйства.

Таким образом, исследование процесса становления и развития БАС, формирование периодизации и воссоздания целостной картины их эволюции становится актуальной научно-технической задачей. Проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на создание БАС, алгоритмов и методов мониторинга и обработки данных, является актуальной и важной задачей, способствующей повышению конкурентоспособности российского агропромышленного комплекса.

**Степень разработанности проблемы.** Становление и развитие сельскохозяйственной техники освещали в своих работах академики РАН М.Н. Ерохин<sup>1</sup>, А.Ю. Измайлов<sup>2</sup>, С.В. Кричевский<sup>3</sup>, Ю.Ф. Лачуга<sup>4</sup>, Я.П. Лобачевский<sup>5</sup>, А.Ю. Несмиян<sup>6</sup>, В.Д. Попов<sup>7</sup>, В.Ф. Федоренко<sup>8</sup>, В.И. Черноиванов<sup>9</sup>, В.В. Якушев<sup>10</sup> и член-корреспонденты РАН Н.К. Мазитов<sup>11</sup>, А.В. Вражнов<sup>12</sup>, профессора Э.В. Жалнин, А.Г. Арженовский<sup>13</sup> и др. В своей докторской диссертации А.В. Титенок<sup>14</sup> исследует вопросы становления и развития механизации сельского хозяйства. Докторская диссертация Ю.С. Ценч<sup>15</sup> посвящена исследованию становления и развития научно-технического потенциала механизации сельского хозяйства России. В диссертации определены закономерности эволюции систем и комплексов сельскохозяйственных машин. История применения авиации в сельском хозяйстве отражена в работах А.С. Степанова<sup>16</sup>, Ю.В. Кузьмина<sup>17</sup>, Д.А. Соболева<sup>18</sup> и др.

Методы дистанционного мониторинга используются в России на протяжении длительного периода и имеет давнюю историю. Использование аэрофотосъемки в сельском хозяйстве началось в СССР в 1920–1940-х годах. Первые исследования проводились такими учеными, как А.И. Левенгаупт<sup>19</sup>, Л.Я. Селяков<sup>20</sup>, И.С. Сметанин<sup>21</sup>

<sup>1</sup> Ерохин М.Н., Зайцева Н.Л., Алдошин Н.В. Василий Прохорович Горячкин: страницы жизни. - М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2020. – 280 с.

<sup>2</sup> Измайлов А.Ю. ВИМ: история становления и развития // История науки и техники. 2019. № 12. С. 3-10.

<sup>3</sup> Кричевский С. В. Экологическая история техники от технологий до техносферы XX - начало XXI века. Методология, опыт, перспективы. – М.: «Юнити-Дана», 2023. 367 с.

<sup>4</sup> Лачуга Ю.Ф., Лысенко Е.Г., Орлик Л.С. [и др.] Агроинженерная наука России: становление, современное состояние, стратегия развития: к 100-летию создания Бюро по сельскохозяйственной механике (1907-2007). М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2007. 622 с.

<sup>5</sup> Лобачевский Я.П., Ценч Ю.С., Бейлис В.М. Создание и развитие систем машин и технологий для комплексной механизации технологических процессов в растениеводстве // История науки и техники. 2019. № 12. С. 46-55.

<sup>6</sup> Несмиян А.Ю. История механизации земледелия: учебное пособие. Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ. 2019. 142 с.

<sup>7</sup> Попов В.Д. Становление механизации сельского хозяйства в Северо-Западном регионе страны // История науки и техники. 2019. № 12. С. 31-39.

<sup>8</sup> Федоренко В.Ф. О разработке прогноза научно-технологического развития АПК // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 123. С. 21-28.

<sup>9</sup> Черноиванов В.И. История развития ремонтной базы сельскохозяйственной техники в России // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 1. С. 4-12.

<sup>10</sup> Якушев, В.В. Точное земледелие: теория и практика. – Санкт-Петербург: Агрофизический научно-исследовательский институт РАСХН, 2016. 364 с.

<sup>11</sup> Мазитов Н.К., Сахапов Р.Л., Сорокин К.Н., Хоменко В.В. Возрождение технологического суверенитета отечественной сельскохозяйственной техники - важнейший фактор качества жизни россиян // Проблемы современной экономики. 2024. № 3(91). С. 187-191.

<sup>12</sup> Вражнов А.В. Научное обеспечение земледелия Южного Урала // Земледелие. 2009. № 3. С. 7-10.

<sup>13</sup> Арженовский А.Г. Совершенствование методики и средств определения энергетических и топливно-экономических показателей двигателей тракторов. – Зерноград: Азово-черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2013. 120 с.

<sup>14</sup> Титенок А.В. Развитие механизации сельского хозяйства России: дис...докт. техн. наук. – М. 2001. 429 с.

<sup>15</sup> Ценч Ю.С. Становление и развитие научно-технического потенциала механизации сельского хозяйства России: дис...докт. техн. наук. – М. 2021. 412 с.

<sup>16</sup> Степанов А.С. Авиация СССР в межвоенный период: начало 1930-х - начало 1940-х гг. : дис..... докт. ист. наук - СПб, 2009.- 711 с.

<sup>17</sup> Кузьмин Ю.В. Сельхозавиация СССР и России на фоне конкурентов // АиК. 2021. № 9. С. 14-25.

<sup>18</sup> Соболев Д. А. Авиация на службе сельского хозяйства СССР: история вопроса // Технический сервис машин. 2023. № 2(151). С. 166-176.

<sup>19</sup> Левенгаупт А.И. Опыт применения аэрофотосъемки при изучении Днепровских плавен // Материалы по проблеме Нижнего Днепра. 1931. Т. 2, С. 143-152.

<sup>20</sup> Селяков Л.Я. Из опыта Казахской съемки // М.: Геодезиздат. 1932. № 5. С. 34-41.

<sup>21</sup> Сметанин И.С. Из опыта использования материалов аэрофотосъемки при почвенных исследованиях // Почвоведение. 1940. № 12. С. 66-72.

и др. В этот период аэрофотосъемка применялась для оценки состояния полей и картирования земель, однако методы были трудоемкими и требовали значительных временных затрат на обработку данных. С развитием космических технологий во второй половине XX века мониторинг сельскохозяйственных культур вышел на новый уровень. Научные исследования, посвященные использованию спутниковых данных рассмотрены в работах В.Л. Андроникова<sup>22</sup>, Э.А. Мамедова<sup>23</sup> и др. С 2000 года исследованиями в области цифровизации АПК, использования БАС в сельском хозяйстве, автоматизацией обработки данных и методами дешифрации результатов аэрофотосъемки занимались Б. Бриско<sup>24</sup>, В.В. Дедкова<sup>25</sup>, А.С. Дорохов<sup>26</sup>, А.В. Кабонен<sup>27</sup>, М.Ю. Катаев<sup>28</sup>, А.Н. Кренке<sup>29</sup>, Г.И. Личман<sup>30</sup>, Е.М. Митрофанов<sup>31</sup>, С.Г. Мударисов<sup>32</sup>, Е.В. Труфляк<sup>33</sup>, Ю.С. Чжай<sup>34</sup> и др.

Данные ученые внесли существенный вклад в развитие БАС в сельском хозяйстве. За 100-летний период сформирован огромный опыт методов дешифрирования сельскохозяйственных угодий по материалам аэрофотосъемки и космическим снимкам, и в настоящее время их эффективность не вызывает сомнений. Однако разработка системы мониторинга сельскохозяйственных культур на основе аэрофотосъемки остается недостаточно решенной задачей. Во многом это связано с уровнем технического развития БАС и аппаратуры для аэрофотосъемки. Дальнейшее развитие связано с автоматизацией обработки данных, интеллектуализацией и миниатюризацией системы управления полетом и аэросъемочной аппаратуры, которая приведет к повышению производительности работы БАС и уменьшению экономических затрат на проведение мониторинга сельскохозяйственных культур.

---

<sup>22</sup> В.Л. Андроников [и др.] Опыт составления карты орошаемых территорий Средней Азии с использованием материалов космической съемки – как нового метода изучения мелиоративного состояния почв // Современные методы исследования состояния почв. – М.: Изд-во МГУ, 1983. 123 с.

<sup>23</sup> Мамедов Э.А. Изучение засоленных земель и солончаков с помощью космических методов // Исследование Земли из космоса. 1985. № 1. С. 60–61.

<sup>24</sup> Brisco V., Brown R., Hirose T., McNairn H., Staenz, K. Precision agriculture and the role of remote sensing: a review. Canadian journal of remote sensing. 2014. 24(3). pp. 315-327.

<sup>25</sup> Дедкова В.В. Совершенствование методики обработки материалов аэрофотосъемки с беспилотного воздушного судна для трехмерного моделирования территорий: дис... канд. техн. наук. СПб: 2022. 137 с.

<sup>26</sup> Дорохов А.С. [и др.]. Технология цифровых двойников в сельском хозяйстве: перспективы применения // Агроинженерия. 2023. Т. 25, № 4. С. 14-25.

<sup>27</sup> Кабонен А.В. Оценка состояния и структуры насаждений с применением аэрофотосъемки и лазерного сканирования: дис...канд. с.-х. наук. – Петрозаводск, 2024. 118 с.

<sup>28</sup> Катаев М.Ю., Карташов Е.Ю., Рябухин В.В. [и др.] Методика сегментации изображений беспилотных летательных аппаратов с помощью нейронных сетей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20, № 1. С. 55–66.

<sup>29</sup> Кренке А.Н. Коррекция почвенных карт на основе данных дистанционного зондирования и цифровой модели рельефа // Цифровая почвенная картография: теоретические и экспериментальные исследования. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, 2012. С. 284–302.

<sup>30</sup> Личман Г.И., Смирнов И.Г., Личман А.А., Беленков А.И. Фундаментальные и прикладные исследования по точному земледелию: основные направления // Нивы России. 2016. № 8(141). С. 70-72.

<sup>31</sup> Митрофанов Е.М., Анисочкин Г.В., Гудков Н. С. [и др.] Измерение полноты лесных насаждений по материалам беспилотной аэрофотосъемки высокого разрешения // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2021. Т. 65, № 3. С. 302-307.

<sup>32</sup> Мударисов С.Г. [и др.]. Автоматическое обнаружение и идентификация болезней пшеницы с использованием методов глубокого обучения и применением дронов в режиме реального времени // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2024. Т. 19, № 2(74). С. 90-104.

<sup>33</sup> Труфляк Е.В. [и др.] Реализация технологии беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. 2021. № 2(11). С. 373-378.

<sup>34</sup> Zhai Y.S., Thomasson J.A., Boggess J.E., Sui R.X. Soil texture classification with artificial neural networks operating on remote sensing data // Computers and Electronics in Agriculture. 2006. Vol. 54. P. 53–68.

**Научная проблема.** Определение закономерностей эволюции системы управления полётом и средств аэрофотосъёмки для систематизации, периодизации и создания целостной картины развития БАС в сельском хозяйстве. Разработка научно-методических и практических решений на основе БАС и технологий искусственного интеллекта (ИИ), направленных на повышение эффективности АПК в условиях цифровой трансформации.

**Научная гипотеза.** Систематизация и периодизация основных тенденций развития системы управления полётом и средств аэрофотосъёмки БАС позволит выявить ключевые этапы развития БАС для цифрового мониторинга сельскохозяйственных угодий, что в свою очередь даст возможность разработать научно-методические и практические решения, направленные на повышение эффективности АПК в условиях цифровизации. Повышение эффективности сельскохозяйственных технологий в растениеводстве может быть достигнуто путём разработки системы цифрового мониторинга сельскохозяйственных биологических объектов на основе БАС, методов мультиспектральной аэрофотосъёмки, алгоритмов обработки данных, свёрточных нейронных сетей глубокого обучения и технических средств, обеспечивающих автоматизацию технологических процессов.

**Цель диссертации** – ретроспективный анализ и выявление основных тенденций в развитии системы управления полётом БАС и средств аэрофотосъёмки сельскохозяйственных биообъектов для создания целостной картины развития БАС в сельском хозяйстве, обоснование и разработка технических средств и программного обеспечения для цифрового мониторинга сельскохозяйственных биообъектов и управления технологическими процессами в системе сельскохозяйственных технологий.

**Задачи исследования:**

- 1) Исследовать процесс эволюции, определить временные периоды и тенденции развития системы управления полётом и средств аэрофотосъёмки беспилотной авиационной системы, применяемой в сельском хозяйстве.
- 2) Разработать и теоретически обосновать ключевые аспекты применения беспилотной авиационной системы и программно-аппаратных средств для цифрового мониторинга и опрыскивания сельскохозяйственных биообъектов.
- 3) Выполнить теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров беспилотной авиационной системы, разработать беспилотные воздушные суда, элементы полезной нагрузки, технические средства и программное обеспечение на основе нейронных сетей глубокого обучения для применения в растениеводстве.
- 4) Провести экспериментальные исследования беспилотных авиационных систем, технических средств и технологического процесса цифрового мониторинга сельскохозяйственных биообъектов и реализации технологических процессов в системе сельскохозяйственных операций.
- 5) Провести экономическую оценку использования беспилотных авиационных систем.

**Объект исследования** – БАС и технические средства цифрового мониторинга и управления технологическими процессами в системе сельскохозяйственных технологий, включая: технические компоненты БАС, систему управления полётом, специализированные подвесы и средства аэрофотосъёмки, мультиспектральные снимки и методы их обработки и анализа, программное обеспечение и нейросетевые модели классификации состояния посевов.

**Предмет исследования** – эволюционные факторы, временные периоды, тенденции развития системы управления полётом и средств аэрофотосъёмки БАС, закономерности функционирования БАС для цифрового мониторинга и управления технологическими процессами в системе сельскохозяйственных технологий.

**Научная новизна исследования:**

- установлены основные тенденции и закономерности изменения технических и технологических параметров системы управления полётом и средств аэрофотосъёмки, определена целостная картина становления и развития БВС, применяемого в сельском хозяйстве;
- созданы алгоритмы цифрового мониторинга и дифференцированного опрыскивания сельскохозяйственных культур с применением БАС;
- обоснованы конструктивно-технологические параметры БВС с взлетной массой до 30 кг и элементов полезной нагрузки для цифрового мониторинга сельскохозяйственных биообъектов и реализации технологических процессов в растениеводстве;
- установлены технологические параметры мониторинга и технических средств, влияющие на качество цифровых карт;
- разработаны алгоритмы для подготовки обучающих данных и классификации состояния посевов на основе свёрточных нейронных сетей глубокого обучения;
- выявлены зависимости между состоянием сельскохозяйственных, инвазивных растений и результатами мультиспектральной аэрофотосъёмки.

**Теоретическая и практическая значимость диссертации.** Результаты ретроспективного анализа дают возможность определить наиболее перспективные технические решения и методы, используемые при разработке БАС сельскохозяйственного назначения и проведении цифрового мониторинга сельскохозяйственных биообъектов. Разработаны и обоснованы ключевые аспекты применения БАС в сельском хозяйстве, обеспечивающие высокоточную аэрофотосъёмку, автоматизацию обработки данных с помощью алгоритмов ИИ и сокращение временных и финансовых затрат на проведение технологических операций.

Разработаны БВС, элементы полезной нагрузки, технические средства и программное обеспечение, позволяющие повысить эффективность проведения цифрового мониторинга и реализацию технологических процессов в растениеводстве. Созданы методы оценки состояния сельскохозяйственных культур (сои, ярового ячменя, озимой пшеницы, картофеля) и картирования борщевика Сосновского по данным цифрового мониторинга с БАС, обеспечивающие исключение субъективной оценки, возможность проведения статистического анализа, прогнозирование развития растений и сокращение расхода ядохимикатов при уничтожении сорной растительности.

**Методология и методы исследований.** Методологическую основу диссертации составляет сочетание общенаучных подходов и принципов объективности, историзма, целостности, с применением проблемно-хронологического, сравнительно-исторического и ретроспективного методов, что обеспечило последовательный анализ событий в их временной динамике и взаимосвязи. Были исследованы оригинальные работы отечественных и зарубежных авторов, научные журналы, монографии, материалы конференций, экспозиции музеев, фотоматериалы и исходный код программного обеспечения в открытом доступе.

Теоретические исследования проводились с использованием методов качественного и количественного анализа, машинного обучения, в том числе нейросетевых методов распознавания объектов. Изучены пространственно-временные закономерности изменения посевов зерновых, зернобобовых, овощных и технических культур в течение вегетационного периода. В работе использованы современные методы компьютерного моделирования и программирования. Компьютерное моделирование осуществлялось с помощью программных средств САПР КОМПАС-3D v18.1, Solid Works, Autodesk Fusion 360. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с помощью программных средств Statistica, Math CAD, Excel. Для подготовки деталей к 3-D печати использовались программные средства Cura, Snapmaker Luban. Для фотограмметрической обработки и анализа данных аэрофотосъёмки использовалось программное обеспечение Agisoft Metashape, Pix4DMapper, Pix4DFields, Global Mapper, QGIS. В экспериментальных исследованиях использовались общеизвестные методики, ГОСТы, ОСТы, статистические методы анализа данных, а также разработанные на их основе частные методики.

**Положения, выносимые на защиту:**

- эволюционные факторы становления и развития системы управления полётом беспилотных авиационных систем и средств аэрофотосъёмки, основные характеристики эволюционного совершенствования программно-аппаратных компонентов БАС, тенденции изменения параметров их технического и технологического развития;
- функциональная схема и алгоритмы проведения цифрового мониторинга сельскохозяйственных биообъектов и реализации технологических процессов с помощью БАС;
- конструктивно-технологические параметры БВС, специализированных подвесов, камер видимого диапазона и мультиспектральной, системы электростатической подзарядки капель рабочей жидкости, отвечающие требованиям к техническим решениям для цифрового мониторинга и управления технологическими процессами сельскохозяйственных биообъектов;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований по разработке БАС, технических средств, программного обеспечения и технологического процесса цифрового мониторинга сельскохозяйственных биообъектов.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Результаты диссертации нашли применение при выполнении научно-исследовательских работ при участии автора: НИР №10.9.02-2018 «Разработать алгоритмы, программное обеспечение и технологии мониторинга состояния растений и качества выполнения технологических процессов в растениеводстве, в т.ч. в искусственных экосистемах», НИР №0581-2019-0012 «Разработать методологию и технические решения для управления интеллектуальными технологиями в цифровом сельском хозяйстве», НИР FGUN-2022-0018 «Разработать методы, технологии и технические средства для цифрового мониторинга и управления технологическими процессами в сельскохозяйственном производстве».

Основные положения диссертации доложены, обсуждены и одобрены на международных и всероссийских научно-практических конференциях: ФГБНУ ФНАЦ ВИМ «Цифровые технологии и роботизированные технические средства для сельского хозяйства», «Интеллектуальные машинные технологии и техника в сельском хозяйстве», «Агробиоинженерные инновации в сельском хозяйстве», «Агроэкологическая безопасность, энергоэффективные спектральные и лазерные

технологии в повышении продуктивности сельского хозяйства», «Энергообеспечение АПК» (2018-2023 гг., Москва), МАИ (НИУ) «Беспилотные летательные аппараты» (2020 г., Москва), «INTERAGROMASH 2021» (2021 г., Ростов-на-Дону), СПб ФИЦ РАН «Цифровизация сельского хозяйства и органического производства» (2021-2025 гг., Санкт-Петербург, Барнаул), ФГБНУ ФНЦ ЗБК «Векторы развития селекции и семеноводства зерновых, зернобобовых и крупяных культур как основа продовольственного суверенитета страны» (2021 г., Орёл), ИМАШ РАН «Искусственный интеллект и сельскохозяйственная инженерия» (2021 г., Москва), СФНЦА РАН «Информационные техно-логии, системы и приборы в АПК» (2021 г., Новосибирск), ФГБНУ АФИ «Агрофизический институт: 90 лет на службе земледелия и растениеводства» (2022 г., Санкт-Петербург), ИЦиГ СО РАН «Генетика, геномика, биоинформатика и биотехнология растений» PlantGenSchool 2022 (2022 г., Новосибирск), «Устойчивое развитие в сельском хозяйстве, экологическая безопасность и энергетическая эффективность» (EESTE-II-2022) (2022 г., Душанбе, Республика Таджикистан), ФГБОУ ВО РГАТУ «Научно-инновационные аспекты аграрного производства: перспективы развития» (2022 г., Рязань), «Инновационные технологии в науках об окружающей среде и образовании» (2023 г., Краснодарский край), «Международная конференция Российского национального комитета по истории и философии науки и техники РАН» (2024 г., Москва), «Глобальные и национальные проблемы продовольственной безопасности: уроки, вызовы и новые возможности» (2024 г., Екатеринбург), «Международная выставка-форум «AGROBRICS+» (2024 г., Москва), 3-я Африканская конференция по точному земледелию (2024 г., Марракеш, Марокко).

Разработанные беспилотные воздушные системы демонстрировались на Российских агропромышленных выставках «Золотая осень» (г. Москва, ВДНХ) в 2019-2024 гг. и награждены золотыми и серебряными медалями выставки. Золотые медали получены за разработки: «Платформенное решение для мониторинга селекционных полей с помощью БПЛА» (2019 г.), «Платформенное решение для высокоточного мониторинга сельскохозяйственных полей с помощью БПЛА» (2020 г.), «Агродрон для цифрового мониторинга состояния почвы и растений» (2021 г.), серебряная медаль за разработку «Малогабаритный БВС для мониторинга в условиях закрытого грунта» (2024 г.).

**Реализация результатов исследований.** Беспилотные авиационные системы были испытаны в производственных условиях и внедрены в ИСА – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в Рязанской области и ФГБНУ «Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур» в Орловской области. Результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, ООО «Уральский научно-исследовательский институт экономической безопасности и развития сельских территорий», Инжинирингового центра Кировской области ФГБОУ «Вятский государственный университет» и Калужского филиала ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева». Получены акты внедрения.

**Публикации по теме диссертации.** Основные теоретические положения и результаты исследований опубликованы в 64 работах, из которых 21 статья в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 14 статей в изданиях, включенных в международные базы данных Web of Science и Scopus, 2 патента на изобретение и 11 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, словаря терминов, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы, включающего 209 наименований, и приложений. Диссертация изложена на 456 страницах, содержит 81 таблицу, 206 рисунков и 5 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, представлены научная новизна работы и основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения по апробации результатов исследования, количеству научных публикаций, объёму и структуре диссертации.

**В первой главе «Развитие беспилотных авиационных систем в сельскохозяйственном производстве»** проведен ретроспективный анализ системы управления полётом БАС и средств аэрофотосъёмки, проанализировано применение беспилотных авиационных систем как инструмента цифровой трансформации сельского хозяйства. В результате ретроспективного анализа развития систем управления полётом и средств аэрофотосъёмки в сельском хозяйстве выполнена периодизация, включающая 6 этапов.

1 этап (1858-1908 годы) – это период первых экспериментальных разработок средств аэрофотосъёмки, которые велись во многих странах, включая Российскую империю. Он характеризовался экспериментальными съёмками с различных носителей, таких как воздушные шары. В данный период аэрофотосъёмка не применялась в сельскохозяйственных целях, а была важным подготовительным этапом перед появлением более устойчивых летательных аппаратов и более совершенной фотоаппаратуры.

2 этап (1909-1945 годы) знаменуется появлением первых БПЛА в 1917 году. Система управления полётом первых БПЛА представляла собой сложный часовой



*Рисунок 1 – Модель «Жук Кеттеринга» на выставке в Национальном музее Военно-воздушных сил США в Дейтоне, штат Огайо<sup>35</sup>*

механизм с минимальными возможностями автопилотирования (рисунок 1). Активное развитие системы управления полётом БПЛА обеспечило возможность установки параметров курса и высоты, и увеличенную дальность полёта до 300 км, которая связана с отсутствием дистанционного управления и одноразовостью применения. Развитие средств аэрофотосъёмки носило скачкообразный характер. Были созданы высокоскоростные плёночные фотоаппараты и жёсткие крепления для их установки на борт самолета. Аэрофотосъёмку стали применять для мониторинга сельскохозяйственных посевов с помощью самолетов гражданской авиации.

<sup>35</sup> Национальный музей ВВС США. <https://www.warhistoryonline.com/war-articles/kettering-bug-first-unmanned-drone-technology.html>



Рисунок 2 – Карта сельскохозяйственного поля по спутниковым данным: сверху съемка 1964 г.; снизу съемка 1980 г.

3 этап (1946-1979 годы) характеризовался развитием космических технологий, средств картографического анализа и зарождением спутникового мониторинга, что привело к появлению понятия «дистанционное зондирование». В сельском хозяйстве стали использовать спутниковые снимки для анализа состояния сельскохозяйственных культур (рисунок 2).

В этот период изменилась конструкция БПЛА, активно развивалась цветная и спектральная аэрофотосъемка, отмечена тенденция по увеличению количества кадров на пленке до 630 шт. в середине 1960-х гг. Система управления полётом БПЛА позволяла совершать взлет и посадку с горизонтальной поверхности, контролировать полёт по радиолокационным приборам с дальностью до 150 км.

4 этап (1980-2012 годы) сопровождался зарождением современных беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа и развитием цифрового аэрофотоаппарата. Достижения в области миниатюризации системы управления полётом и камер привели к появлению полётных контроллеров и «малых» БПЛА, взлетной массой до 30 кг. Полётные

контроллеры установили стандарты в конструировании беспилотных летательных аппаратов и разработке программного обеспечения для них. Полётный контроллер был ключевым компонентом системы управления полётом БПЛА, он обеспечивал стабильный полёт с дальностью до 1 км. Развитие цифровых камер в этот период характеризовалась переходом на CMOS-матрицы и записью данных в формате JPEG на кассеты и SD-карты. Благодаря развитию технологий хранения данных емкость носителей позволяла сохранять от 25 до 2000 изображений.

В начале XXI века тенденция на увеличение количества изображений связана с развитием полупроводниковых технологий, совершенствованием алгоритмов обработки изображений, интеграцией с искусственным интеллектом, а также научными исследованиями в области оптики, фотоники и нанотехнологий (рисунок 3). Несмотря на многочисленные преимущества

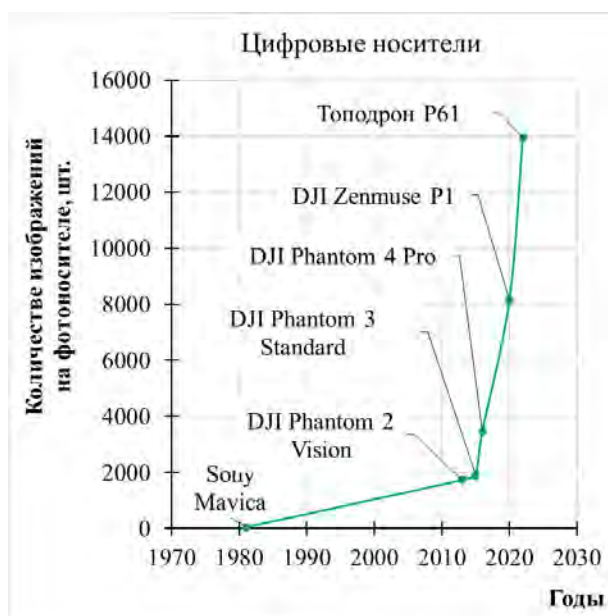


Рисунок 3 – Изменение количества изображений на фотоносителе с конца XX по начало XXI века

и возможности полётных контроллеров БПЛА не применялись для сельского хозяйства в связи с существенными недостатками, которые приводили к компромиссу между безопасным полётом и возможностью выполнения съёмки.

5 этап (январь-октябрь 2013 года) завершился становлением готовых решений БПЛА. В январе 2013 г. был выпущен первый серийный коммерческий БПЛА, взлетной массой до 30 кг, на который с помощью специального подвеса устанавливалась цифровая камера с разрешением 12 Мп. Полёт осуществлялся с помощью пульта дистанционного управления, управление камерой отсутствовало, система управления полётом обеспечивала стабильный полёт, возвращение и посадку БПЛА в точку взлета. БПЛА использовались в основном для художественной съёмки, но находили применение и в сельском хозяйстве.

6 этап (октябрь 2013 года по настоящее время) характеризуется интеграцией интеллектуальных функций в полётный контроллер. Внедрение интеллектуальных алгоритмов автопилота («умные» взлет и посадка, возврат на место взлета) и установка



Рисунок 4 – БВС DJI Matrice 200 V2 над полем картофеля, Московская область, 3 августа 2022 г.

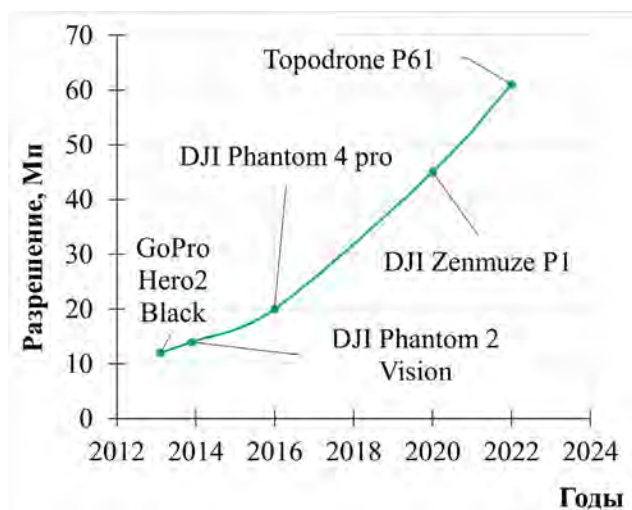


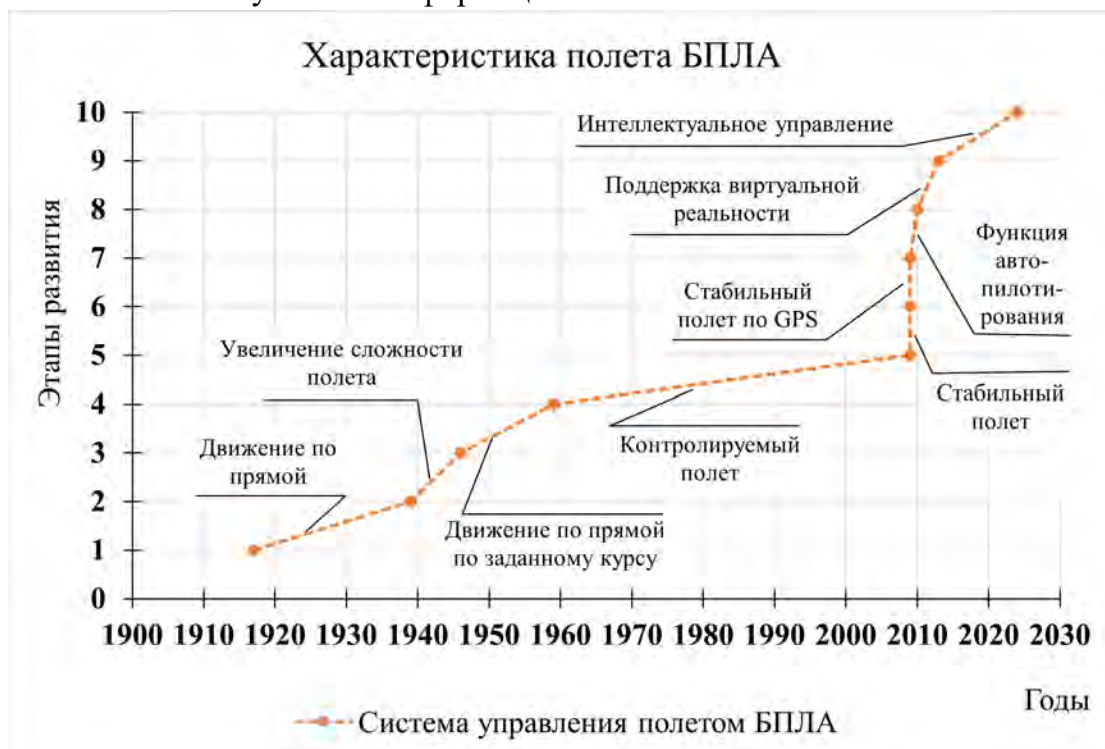
Рисунок 5 – Разрешение цифровых RGB камер, устанавливаемых на БВС взлетной массой менее 30 кг, в XXI веке

круговой системы обнаружения препятствий повысили безопасность и позволили реализовать управление БПЛА и его камерой через смартфон. Тенденция на повышение производительности системы управления полётом, обеспечила управление всеми периферийными устройствами, установленными на борт БВС. В 2016 году были утверждены термины «беспилотное воздушное судно» (БВС) вместо БПЛА и «беспилотная авиационная система» (БАС). Такие комплексы стали активно использоваться в сельском хозяйстве для наблюдения за развитием сельскохозяйственных культур (рисунок 4).

В средствах аэрофотосъёмки наблюдается тенденция к повышению разрешения цифровых камер до 61 Мп и увеличения количества записываемых изображений до 14 000 шт. Камеры с механическим затвором сохранили свою востребованность в области аэрофотосъёмки. На рисунке 5 представлен график развития камер, устанавливаемых на БВС взлетной массой до 30 кг. За точку отсчета была выбрана камера GoPro, которую устанавливали на DJI Phantom 1 в 2013 году. На графике видно, что за исследуемый период разрешение цифровых камер увеличилось

в пять раз. Современные камеры DJI Zenmuse P1 с разрешением 45 Мп и Topodron P61 с разрешением 61 Мп позволяют собирать высокодетализированные изображения при высоте полёта до 150 м. Высокодетализированные цифровые карты, в том числе вегетационные карты, всё больше используются вместе с технологиями искусственного интеллекта для решения сельскохозяйственных задач, в частности для оценки состояния сельскохозяйственных культур, распознавания заболеваний, картирования инвазивных растений и др.

Система управления полётом БВС появилась 106 лет назад в 1917 г., но основное развитие получила в последние десять лет (2013-2023 гг.). На рисунке 6 представлены ключевые особенности развития системы управления полётом БВС. Исторический анализ развития систем управления полётом БВС показывает, что система управления полётом до 1942 г. была простой, обеспечивала минимальные возможности, дистанционное управление осуществлялось только в пределах прямой видимости. В период 1942-1944 годов система управления полётом обеспечивала увеличенную дальность полёта и большую точность по направлению курса. С 1950 г. система управления позволяла осуществлять контролируемый полёт по приборам радиолокационным способом. С появлением полётного контроллера в 2009 г. БВС стали обеспечивать множество функций, в том числе: стабильный полёт, автономный полёт и интеллектуальное управление, повлиявшие на дальнейшее развитие возможностей БВС для аэрофотосъёмки. Дальнейшее развитие будет связано с внедрением ИИ в систему управления полётом и подвесное оборудование, что обеспечит безопасный цифровой мониторинг сельскохозяйственных биообъектов в соответствии с нормативными требованиями, оперативный анализ данных и принятие решений на основе актуальной информации о состоянии посевов.



*Рисунок 6 – Этапы развития БПЛА*

На первых этапах развития системы управления полётом (I-III этапы) большая дальность полёта БПЛА была связана с отсутствием дистанционного контроля

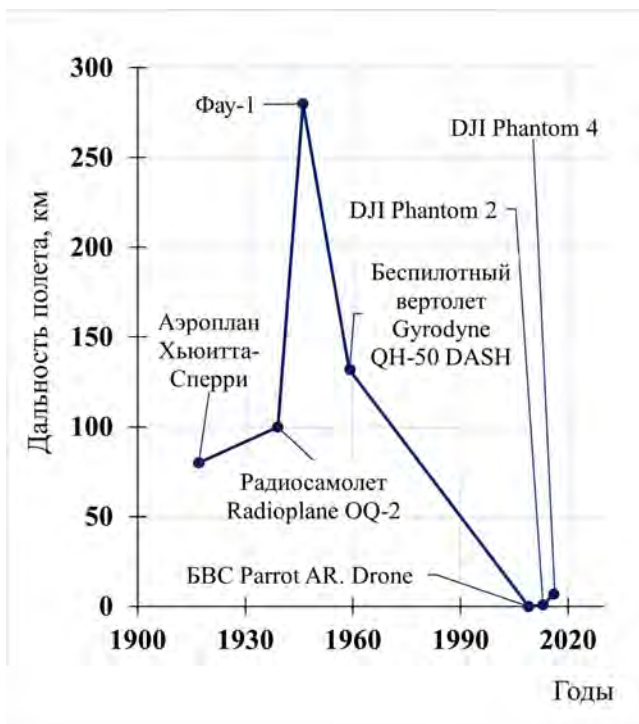


Рисунок 7 – Дальность полёта БПЛА

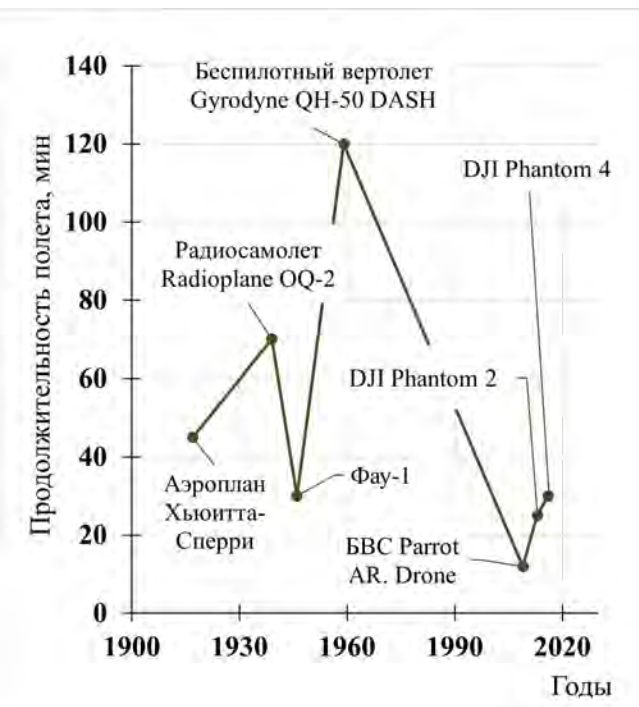


Рисунок 8 – Продолжительность полёта БПЛА

управления полётом и одноразовостью применения (рисунок 7). Появление новых протоколов связи и установление национальных и международных стандартов (ограничения на использование радиочастот и мощности передатчиков) повлияло на дальность полёта БПЛА. Повышение энергоэффективности элементов системы управления полётом и емкости аккумуляторов позволили увеличить дальность полёта БВС.

В XX веке на БПЛА устанавливалась силовая установка в виде двигателя внутреннего сгорания или реактивного двигателя. Это обеспечивало БПЛА длительное время полёта (рисунок 8). Переход на электрические силовые установки и использование аккумуляторных батарей в XXI веке сократило время полёта. Тем не менее, благодаря развитию аккумуляторных батарей и повышению технологий энергоэффективности, наблюдается постепенное увеличение времени полёта современных БВС.

В таблице 1 показаны основные этапы развития системы управления полётом и средств аэрофотосъёмки, связанных с изменением типа камер и летательных аппаратов, на которые они устанавливались. На основе таблицы 1 создан график, показывающий ключевые этапы установки камеры на борт летательных аппаратов (рисунок 9). В 1940-е годы замечен скачок в развитии систем управления полётом БПЛА, позволивший установить камеру на борт и сделать изображения на большой высоте. Дальнейшее развитие системы

управления полётом и средств аэрофотосъёмки позволяло безопасно совершать полёты и управлять камерой, но эти процессы выполнялись изолированно. В начале 2013 г. миниатюрные камеры устанавливали на БПЛА, но все еще не было возможности управлять камерой. С конца 2013 г. интеграция камеры в систему управления полётом БПЛА позволила акцентировать внимание внешнего пилота на фото- и видеосъёмку и не отвлекаться на управление. По мере развития полётных контроллеров и съёмочного оборудования их производительность и возможности

стремительно растут. В ближайший период (2025-2030 гг.) это позволит внедрить технологии искусственного интеллекта в систему управления полётом и в анализ данных с камер.

Таблица 1 – Этапы развития систем управления полётом БВС и средств аэрофотосъёмки

Развитие средств аэрофотосъёмки		Развитие системы управления полётом БВС	
1858-1908	Первые экспериментальные разработки аэрофотоаппаратуры		
1909-1945	Оборудование для аэрофотосъёмки с самолетов	1917	Первые БПЛА
		1939	Радиоуправляемые БПЛА
		1939-1945	Летательные аппараты времен Второй мировой войны
1946-1979	Начало развития дистанционного зондирования Земли	1959	Беспилотный вертолет
1980-2012	Развитие цифровых аэрофотоаппаратов для съёмки с борта БПЛА	2009	Полётные контроллеры для моделирования
Январь 2013	Установка миниатюрной камеры на БПЛА взлетной массой до 30 кг	2013	Готовые решения с интеллектуальным управлением
Октябрь 2013	Интегрированная камера на БПЛА взлетной массой до 30 кг		

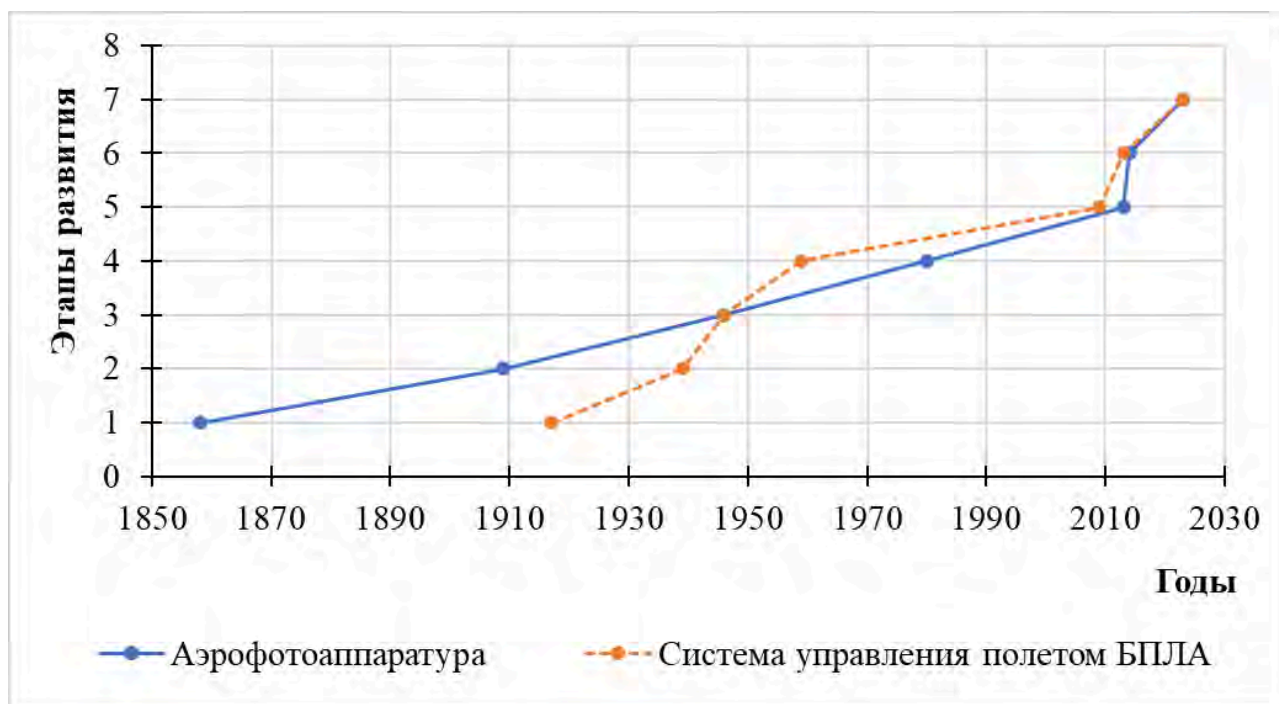


Рисунок 9 – Развитие системы управления полётом БПЛА и средств аэрофотосъёмки

Таким образом, в результате анализа системы управления полётом БВС и средств аэрофотосъёмки за исследуемый период нами выявлены следующие основные тенденции их развития:

- улучшился тип управления полётом (механическое, с пульта дистанционного управления, со смартфона);
- повысилось разрешение камер и объём памяти носителей;

- увеличилось число датчиков, с помощью которых стабилизируется полёт (барометр, гироскоп, акселерометр, магнитометр, лазерный дальномер, инфракрасный, ультразвуковой и видео-поточковый датчики);
- появилась система обнаружения препятствий;
- уменьшился размер системы управления полётом (от нескольких метров до сантиметров);
- уменьшились размеры и масса камер: от нескольких килограммов до граммов;
- появились специальные стабилизированные подвесы для крепления камер;
- улучшились режимы полёта (ручной режим, полёт с видом от первого лица, автоматический и интеллектуальный режимы полёта);
- усовершенствовался метод взлета/посадки (с рельсовой площадки, с парашюта, в ручном, автоматическом и интеллектуальном режимах);
- появились интерфейсы для использования подвесного оборудования (камеры, лазерные сканеры и бортовые компьютеры).

Дальнейшее развитие на ближайшее десятилетие будет заключаться во внедрении искусственного интеллекта в бортовые системы БВС. Это позволит создать эффективную и безопасную систему цифрового мониторинга сельхозкультур, соответствующую всем нормативам, оперативно анализировать данные и принимать решения на основе актуальной информации о состоянии посевов.

В результате проведенного анализа научных исследований зарубежных и отечественных авторов, было выявлено, что с каждым годом интерес к технологиям БВС продолжает расти. Качественный скачок их применения в сельском хозяйстве произошел с появлением новых средств получения и обработки геопространственной информации. В настоящее время самым современным средством проведения мониторинга являются БВС взлетной массой до 30 кг с камерами видимого диапазона и мультиспектральной.

**Во второй главе «Теоретические исследования беспилотных авиационных систем для реализации сельскохозяйственных операций»** рассмотрены теоретические основы, критерии эффективности и практические условия применения беспилотных авиационных систем для сельскохозяйственных процессов, которые включают классификацию БВС, разработку алгоритмов сбора и обработки данных, технические и технологические требования, нормативно-правовое регулирование.

Классификация летательных аппаратов по типу конструкций служит основой для выбора или разработки типа БВС сельскохозяйственного назначения. Установлено, что для мониторинга и опрыскивания следует применять БВС самолётного и мультироторного типов. Архитектура БАС определяет состав оборудования и принципы их взаимодействия для проведения мониторинга или опрыскивания сельскохозяйственных культур. Нами разработана архитектура системы мониторинга, включающая БВС взлетной массой до 30 кг, аэросъёмное оборудование, наземную станцию управления.

Предложен технологический процесс мониторинга сельскохозяйственных биообъектов, включающий 4 этапа: 1) сбор данных, 2) конвертация и подготовка данных, 3) анализ и обработка данных, 4) создание рекомендаций (рисунок 10).



Рисунок 10 – Технологический процесс мониторинга сельскохозяйственных биообъектов

Создана функциональная схема и проведена декомпозиция функции процесса мониторинга сельскохозяйственных биообъектов по стандарту IDEF0 (Integrated Definition Function Modeling), которая дает целостное представление о работе системы мониторинга с БАС и позволяет структурировать процессы, происходящие при выполнении аэрофотосъёмки (рисунок 11).

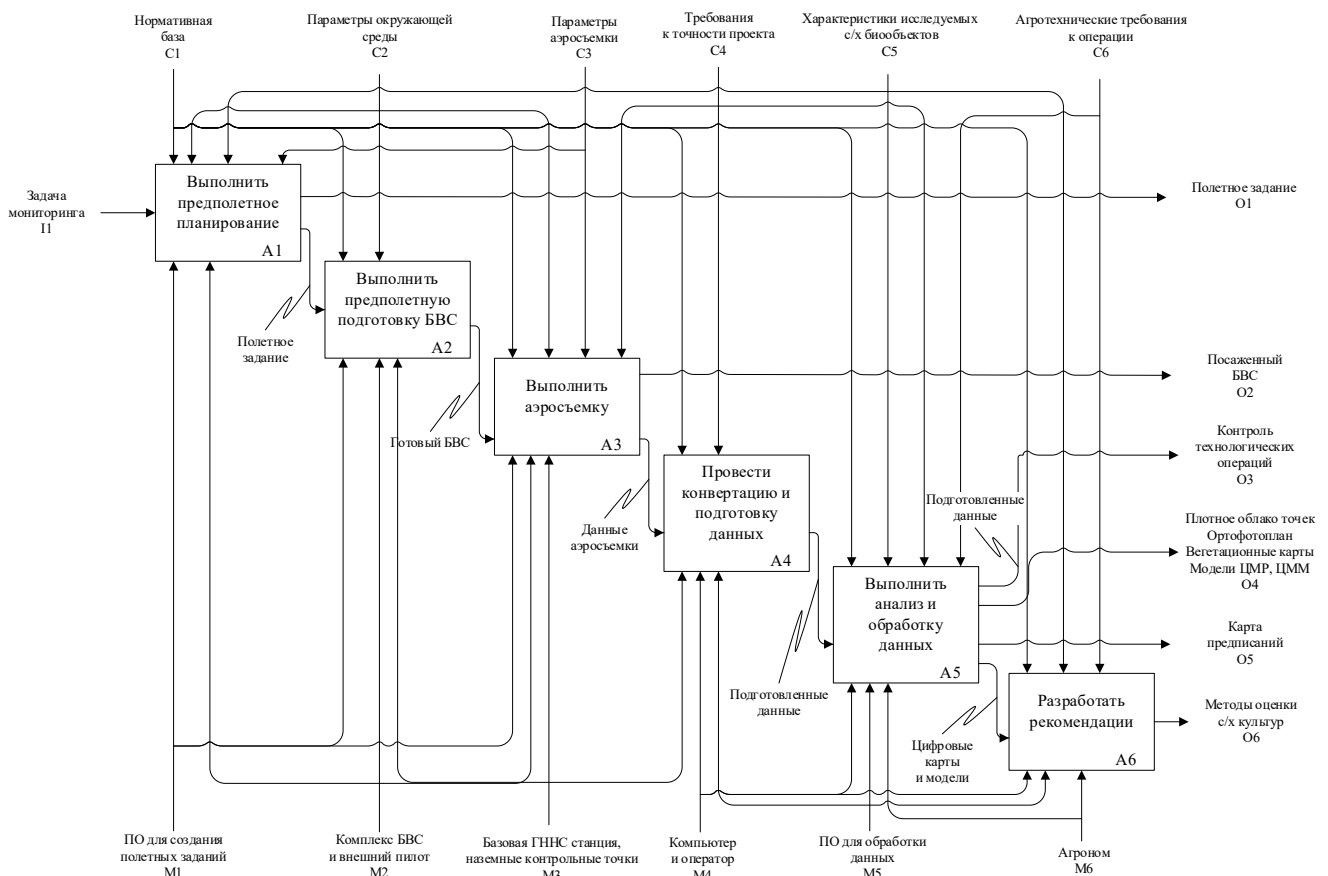


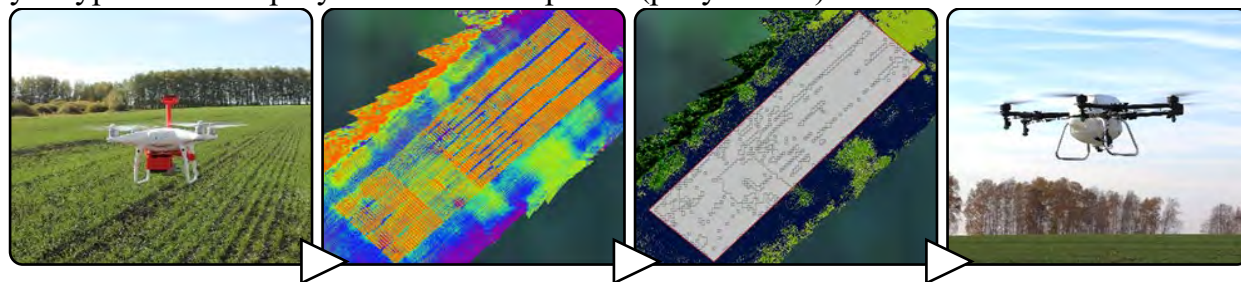
Рисунок 11 – Функциональная схема мониторинга сельскохозяйственных биообъектов

Результат моделирования является основанием для формирования технических требований к элементам БАС, включающий БВС, полезную нагрузку, программное обеспечение и другие составляющие для проведения мониторинга.

Определены основные требования и создан метод для проведения мониторинга с БАС. Установлено, что для получения качественных данных необходимо соблюдать следующие требования: значения продольного и поперечного перекрытий – не менее 75%; высота полёта – 25-150 м, возврат при потере сигнала на высоте от 70 м,

предупреждение о заряде батареи – не менее 30%. Для автоматизации преобразования ГНСС данных разработана программа (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666406 от 31.07.2023). Созданы алгоритмы цифрового мониторинга по сбору, конвертации и подготовке, фотограмметрической обработке данных и созданию рекомендаций, обеспечивающие абсолютную погрешность позиционирования до 10 см (XYZ).

Предложен технологический процесс опрыскивания сельскохозяйственных культур на основе результата мониторинга (рисунок 12).



Сбор  
мультиспектральных  
данных

Создание  
вегетационной  
карты

Создание карты  
предписаний

Дифференцированная  
обработка

Рисунок 12 – Технологический процесс опрыскивания сельскохозяйственных культур

Для дифференцированного опрыскивания с БАС необходима карта предписаний, которая создается на основе мультиспектральных данных. От качества этих данных зависит достоверность итоговой карты предписаний для полётного задания. Созданы алгоритмы разработки карты предписаний и дифференцированного опрыскивания для автоматизированного полёта БАС на основе карт предписаний с заранее заданными параметрами, что повышает точность и безопасность операций.

При мониторинге сельскохозяйственных биообъектов параметры аэрофотосъёмки должны обеспечить бесперебойную запись изображений с камер. Для минимизации времени технологического процесса мониторинга при создании полётного задания необходимо рассчитать следующие параметры: пространственное разрешение на местности (GSD), продольное и поперечное перекрытия, высоту и скорость полёта.

Пространственное разрешение на местности (GSD) зависит от высоты полёта и разрешения камеры. Формула расчета пространственного разрешения (1):

$$GSD = \frac{100 \cdot S_w \cdot h_{fly}}{b_y \cdot F_{tr}}, \quad (1)$$

где,  $GSD$  – пространственное разрешение, см/пикс.;

$h_{fly}$  – высота полёта, м;

$b_y$  – длина изображения, пикс.;

$F_{tr}$  – фокусное расстояние, мм;

$S_w$  – ширина матрицы, мм.

Значения перекрытий полётного задания для RGB-камеры определяются на основе технических спецификаций мультиспектральной камеры. Поперечное перекрытие (2) RGB камеры,  $P_{x1}$ , вычисляется по следующей формуле:

$$P_{x1} = 100 - \frac{B_{x2} \cdot 100}{GSD_1 \cdot b_{x1}}, \quad (2)$$

где,  $P_{x1}$  – поперечное перекрытие, %;

$B_{x2}$  – расстояние между центрами соседних изображений мультиспектральной камеры, см;

$GSD_1$  – пространственное разрешение RGB камеры, см/пикс.;

$b_{x1}$  – ширина изображения RGB камеры, пикс.

Продольное перекрытие (3) RGB камеры,  $P_{y1}$ , определяется по формуле:

$$P_{y1} = 100 - \frac{B_{y2} \cdot 100}{GSD_1 \cdot b_{y1}}, \quad (3)$$

где,  $P_{y1}$  – продольное перекрытие, %;

$B_{y2}$  – расстояние между центрами смежных изображений мультиспектральной камеры, см;

$b_{y1}$  – длина изображения RGB камеры, пикс.

Таким образом, для сбора высокого качества данных необходимо устанавливать поперечное и продольное перекрытия в диапазоне от 70% до 90%. Значения перекрытий влияют на скорость полёта и на продолжительность аэрофотосъёмки. Чем выше значение перекрытия, тем ниже скорость полёта и больше времени необходимо для проведения аэрофотосъёмки.

Скорость полёта  $V_{fly}$ , вычисляется по формуле (4):

$$V_{fly} = \frac{B_x}{t_i \cdot 100}, \quad (4)$$

где,  $V_{fly}$  – скорость полёта, м/с;

$B_x$  – расстояние между центрами соседних изображений, см;

$t_i$  – время, затрачиваемое камерой для создания и записи изображения с одной точки съёмки, с.

Определение времени на создание и запись изображений на карту,  $t_i$ , выполняется по следующей системе уравнений (5):

$$t_i = \begin{cases} t_{tr1}, & \text{если } t_{tr1} \geq t_{c1} \\ t_{c1}, & \text{если } t_{c1} > t_{tr1} \\ t_{tr2}, & \text{если } t_{tr2} \geq t_{c2} \\ t_{c2}, & \text{если } t_{c2} > t_{tr2} \end{cases} \quad (5)$$

где,  $t_{c1}$  – время срабатывания затвора RGB камеры, с;

$t_{tr1}$  – время записи RGB изображений с одной точки съёмки, с;

$t_{c2}$  – время срабатывания затвора мультиспектральной камеры, с;

$t_{tr2}$  – время записи спектральных изображений с одной точки съёмки, с.

Время записи зависит от количества, типа изображений и объема памяти камер (6):

$$t_{tr} = \frac{\sum_{i=n} (l_{nc(i)} \cdot Q_{i(i)})}{V_{tr}}, \quad (6)$$

где,  $l_{nc(i)}$  – количество спектральных каналов одного типа изображений, шт.;

$Q_{i(i)}$  – объем памяти, занимаемый одним изображением одного типа, Мб;

$V_{tr}$  – скорость записи данных на sd-карту, Мб/с;

$l_n$  – количество типов изображений, шт.

Значения скорости БВС в зависимости от требований перекрытия и высоты полёта приведены в таблице 2. С повышением высоты полёта скорость увеличивается,

при увеличении продольного перекрытия скорость снижается, изменение поперечного перекрытия не влияет на скорость БВС. Использование скорости ниже указанной приведет к неэффективному использованию аккумуляторной батареи, а выше – к искажению изображений и пропуску кадров с заданным продольным перекрытием.

Таблица 2– Скорость полёта БВС в зависимости от высоты и параметров перекрытия

Модель камеры	Необходимое перекрытие для мультиспектральной камеры, %	Поперечное перекрытие RGB-камеры, %	Продольное перекрытие RGB-камеры, %	Высота полёта БВС, м												
				30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Parrot Sequoia	75	71	74	2,6	3,4	4,3	5,2	6,0	6,9	7,8	8,6	9,5	10,4	11,2	12,1	13,0
	80	77	79	2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7,0	7,7	8,4	9,1	9,8	10,5
	85	83	84	1,6	2,1	2,7	3,2	3,7	4,3	4,8	5,3	5,9	6,4	6,9	7,5	8,0
MicaSense Altum-PT	75	83	83	1,7	2,3	2,8	3,4	3,9	4,5	5,1	5,6	6,2	6,8	7,3	7,9	8,5
	80	87	87	1,3	1,7	2,2	2,6	3,0	3,5	3,9	4,3	4,8	5,2	5,6	6,1	6,5
	85	90	90	1,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0
MicaSense Red-Edge-P	75	83	83	1,7	2,3	2,8	3,4	3,9	4,5	5,1	5,6	6,2	6,8	7,3	7,9	8,5
	80	86	86	1,4	1,9	2,3	2,8	3,3	3,7	4,2	4,6	5,1	5,6	6,0	6,5	7,0
	85	90	90	1,0	1,3	1,7	2,0	2,3	2,7	3,0	3,3	3,7	4,0	4,3	4,7	5,0
Sentera Single Sensor	75	79	79	2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7,0	7,7	8,4	9,1	9,8	10,5
	80	84	83	1,7	2,3	2,8	3,4	3,9	4,5	5,1	5,6	6,2	6,8	7,3	7,9	8,5
	85	88	88	1,2	1,6	2,0	2,4	2,8	3,2	3,6	4,0	4,4	4,8	5,2	5,6	6,0
Sentera Double 4k	75	79	79	2,1	2,8	3,5	4,2	4,9	5,6	6,3	7,0	7,7	8,4	9,1	9,8	10,5
	80	83	83	1,7	2,3	2,8	3,4	3,9	4,5	5,1	5,6	6,2	6,8	7,3	7,9	8,5
	85	87	87	1,3	1,7	2,2	2,6	3,0	3,5	3,9	4,3	4,8	5,2	5,6	6,1	6,5
Sentera 6X	75	70	70	2,5	3,3	4,1	4,9	5,7	6,6	7,4	8,2	9,0	9,8	10,6	11,5	12,3
	80	70	70	2,0	2,6	3,3	3,9	4,6	5,3	5,9	6,6	7,2	7,9	8,5	9,2	9,9
	85	75	75	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5

Таким образом, рассчитаны значения продольного и поперечного перекрытий, а также скорости полёта БВС для проведения мониторинга с камерами Zenmuse X4S и MicaSense Altum. Установлено, что скорость БВС на высоте 30 м составит 1,7 м/с, на высоте 150 м – 8,5 м/с при продольном перекрытии в 75%. Рекомендуется использовать полученные значения параметров аэрофотосъёмки для создания полётного задания.

С участием автора настоящей работы было разработано мобильное приложение для расчета параметров полётного задания (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665531 от 2.07.2024). Точно рассчитанные параметры полётного задания необходимы для успешного выполнения

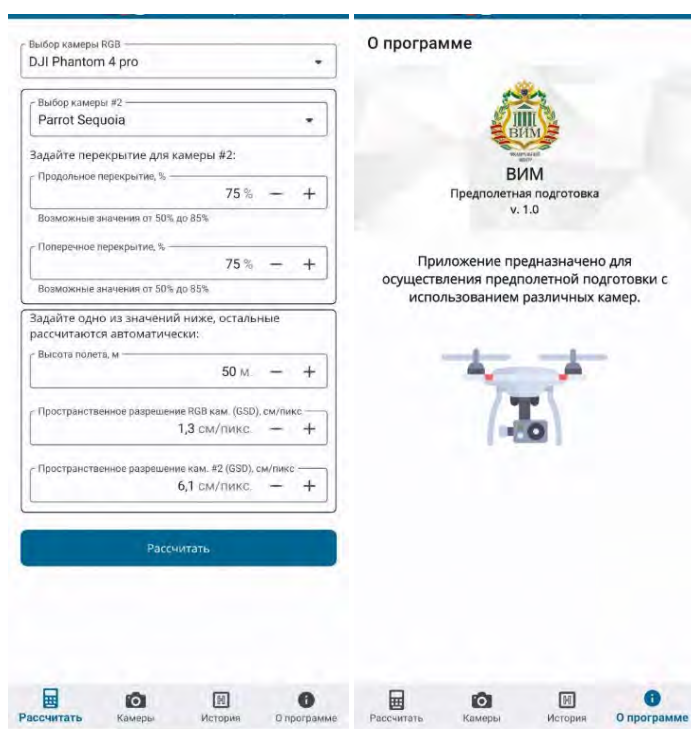


Рисунок 13 – Пользовательский интерфейс мобильного приложения

аэрофотосъёмки и дальнейшей обработки полученных результатов с двух камер одновременно (рисунок 13).

Созданное мобильное приложение представляет собой инструмент для внешнего пилота (оператора) сельскохозяйственной БАС, позволяющий эффективно планировать и выполнять полётные задания, получая при этом качественные данные за один пролет.

Программы по созданию полётного задания не учитывают влияние подвесного оборудования и предполётной подготовки на продолжительность полёта БВС, что приводит к некорректному расчету времени аэрофотосъёмки и количества необходимых аккумуляторных батарей.

Для расчета времени полётного задания  $t_{fly}$ , использовали выражение (7):

$$t_{fly} = \frac{N_y \cdot (L_x + 3 \cdot B_x)}{V_{fly} \cdot 60}, \quad (7)$$

где,  $t_{fly}$  – время полётного задания, мин;

$N_y$  – количество пролётов, шт.;

$V_{fly}$  – скорость полёта, м/с;

$B_x$  – расстояние между центрами соседних изображений, м;

$L_x$  – длина исследуемого участка, м.

С учетом перечисленных параметров приведена итоговая формула (8) для расчета времени полёта с одним комплектом аккумуляторных батарей:

$$t_{max} = (Q_{АКБ} - Q_{ад}) \cdot \frac{100\% - D_R - D_{com}}{(M_{БВС} + m_{по}) \cdot \frac{P_{БВС}}{V_{АКБ}}} \cdot 60 \cdot (1 - L_{fly}), \quad (8)$$

где,  $t_{max}$  – время полёта, мин;

$M_{БВС}$  – масса БВС, кг;

$m_{по}$  – масса подвесного оборудования, кг;

$Q_{ад}$  – емкость аккумулятора для дополнительного подвесного оборудования, Ач;

$D_r$  – запас заряда аккумулятора, %;

$D_{com}$  – разрядка аккумуляторной батареи в ходе подготовки БВС и безопасного возврата домой, %;

$Q_{АКБ}$  – емкость LiPo батареи, Ач;

$P_{БВС}$  – мощность, необходимая для подъема 1 кг оборудования, Вт/кг;

$V_{АКБ}$  – напряжение батареи, В;

$L_{fly}$  – полётная нагрузка, %.

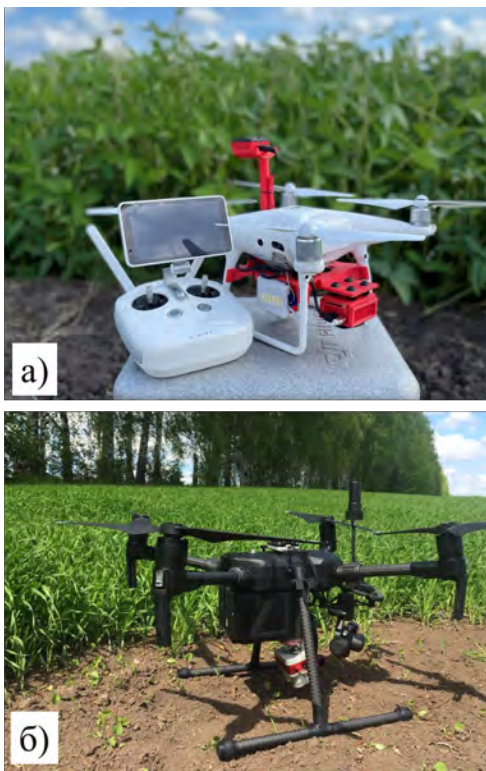


Рисунок 14 – Комплексы БВС с двумя камерами на борту

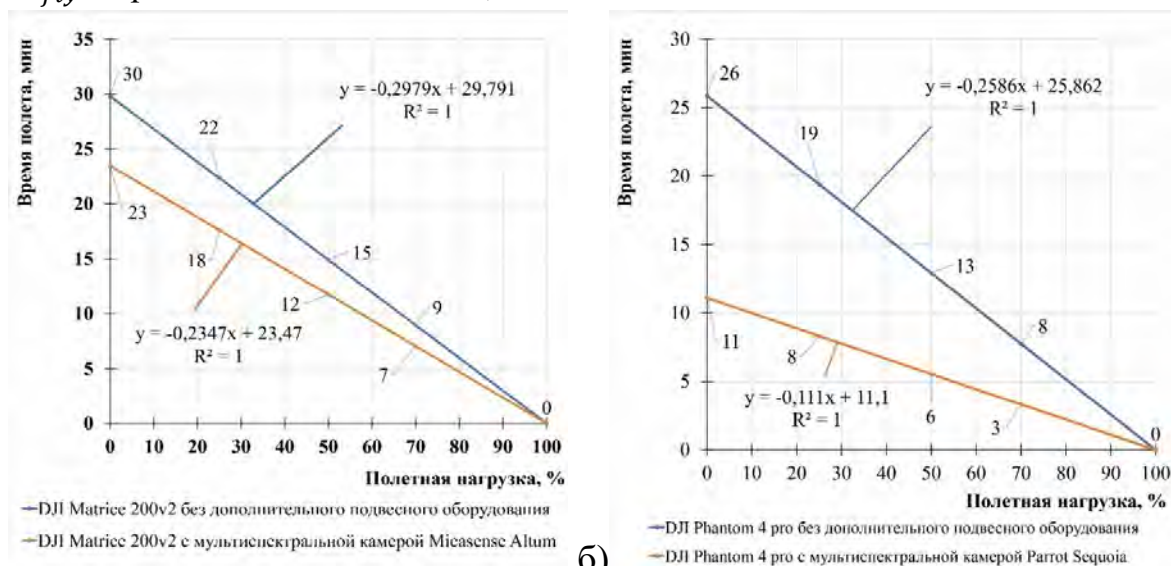
В соответствии с полученной формулой было рассчитано время полёта для комплексов БВС DJI Phantom 4 pro с Parrot Sequoia (рисунок 14, а) и DJI Matrice 200 v2 MicaSense Altum (рисунок 14, б).

Зависимость времени полёта БВС от полётной нагрузки отображена на рисунке 15. В соответствии с техническими характеристиками максимальное время полёта БВС DJI Matrice 200 v2 – 38 мин, DJI Phantom 4 pro – 30 мин. При аэрофотосъёмке с минимальной полётной нагрузкой время полёта комплекса DJI Matrice 200 v2 составило ~18 мин, DJI Phantom 4 pro ~8 мин.

Количество необходимых аккумуляторных батарей,  $N_{АКБ}$ , для аэрофотосъёмки зависит от площади исследуемого участка, поперечного и продольного перекрытия, скорости и высоты полёта. При его расчете применимо выражение (9):

$$N_{АКБ} = \left\lceil \frac{t_{fly}}{t_{max}} \right\rceil, \quad (9)$$

где,  $N_{АКБ}$  – количество необходимых аккумуляторных батарей, шт.;  
 $t_{max}$  – время полёта БВС на одном комплекте аккумуляторных батарей, мин;  
 $t_{fly}$  – время полётного задания, мин.



а)

б)

а) DJI Matrice 200 v2; б) DJI Phantom 4 pro

Рисунок 15 – Зависимость времени полёта БВС от полётной нагрузки

Создан алгоритм расчета времени полёта БВС, позволяющий определить количество аккумуляторных батарей и время для проведения аэрофотосъёмки с дополнительным подвесным оборудованием. В рамках рассчитанного времени обеспечиваются безопасный полёт и предотвращение снижения ресурса аккумуляторной батареи.

Для аэрофотосъёмки сельскохозяйственных биообъектов с целью минимизации времени, затрачиваемого на технологический процесс мониторинга,  $T_m$ , (10), следует снизить время на предполётную подготовку,  $t_{пред}$ , конвертацию,  $t_{конв}$ , и обработку данных,  $t_{об}$ , создание рекомендаций,  $t_{рек}$ , а также увеличить полезное время полёта БВС,  $t_{si}$ , и уменьшить время на замену аккумуляторных батарей,  $t_{АКБ}$ . При этом аэрофотосъёмка должна быть выполнена в промежуток рекомендуемого времени для сбора качественных данных, меняющийся в течение агросезона и зависящий от агрозон,  $t_{рац}$  (11).

$$T_m = t_{пред} + \sum_{i=1}^{n_{fly}} t_{max} + \sum_{i=1}^{n_{fly}} t_{АКБ} + t_{конв} + t_{об} + t_{рек} \rightarrow min, \quad (10)$$

где,  $T_m$  – время, затрачиваемое на технологический процесс мониторинга, мин;  
 $t_{max}$  – время полёта БВС на одном комплекте аккумуляторных батарей, мин;  
 $t_{АКБ}$  – время на замену одного комплекта аккумуляторных батарей, мин;  
 $t_{конв}$  – время, затрачиваемое на конвертацию данных аэрофотосъёмки, мин;  
 $t_{об}$  – время, затрачиваемое на фотограмметрическую обработку данных аэрофотосъёмки, мин;  
 $t_{рек}$  – время, затрачиваемое на создание рекомендаций, мин;  
 $n_{fly}$  – количество полётов.

$$t_{рац} \geq \sum_{i=1}^{n_{fly}} t_{max} + \sum_{i=1}^{n_{fly}} t_{АКБ}, \quad (11)$$

где,  $t_{рац}$  – рекомендуемое время для сбора качественных данных, мин.

Таким образом, функция цели направлена на комплексную минимизацию общего времени технологического процесса мониторинга сельскохозяйственных биообъектов с БАС.

На основе проведенного нами анализа выявлено, что требуемые значения следующих параметров камеры видимого диапазона БВС – значимое условие для получения качественных изображений, которые обеспечивают высокоточный анализ состояния сельскохозяйственных биообъектов: экспозиция (-0.3 до 0.0), ISO (100, 200, 400), диафрагма (F/3.2-F/5.6), фиксированное фокусное расстояние камеры, формат кадра (3:2), скорость срабатывания затвора (1/1600-1/320).

Сформулированы требования к системе цифрового мониторинга в растениеводстве, определен состав системы мониторинга, созданы алгоритмы для проведения высокоточной аэрофотосъёмки, а также конвертации и подготовки данных. Проведение высокоточной аэрофотосъёмки отличается от стандартной установкой базовой станции, использованием ГНСС-приемника на борту БВС и постобработкой, который обеспечивает высокий уровень точности выходных материалов – 3-5 см в плане и по высоте (XYZ). Для оценки погрешности всего проекта применяется формула среднеквадратичной ошибки  $RMSE_p$  (12):

$$RMSE_p = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{GCP}} ((X_{oi} - X_{GNSSi})^2 + (Y_{oi} - Y_{GNSSi})^2 + (Z_{oi} - Z_{GNSSi})^2)}{n}}, \quad (12)$$

где,  $n_{GCP}$  – количество контрольных точек;

$X_{oi}$ ,  $Y_{oi}$  и  $Z_{oi}$  – координаты X, Y и Z после первичной аэротриангуляции;

$X_{GNSSi}$ ,  $Y_{GNSSi}$  и  $Z_{GNSSi}$  – координаты X, Y и Z, измеренные с помощью ГНСС-приёмника в полевых условиях.

Без использования наземных контрольных точек точность проекта в плане и по высоте при стандартной обработке более 1 м, а при высокоточной – в пределах 3-5 см. Использование минимального количества наземных контрольных точек сокращает время, затрачиваемое на предполётное планирование и на обработку данных аэрофотосъёмки. Рекомендуется использовать 3-5 шт. наземных контрольных точек.

Исследование нормативной базы показало, что применения БАС в сельском хозяйстве регламентировано законодательством для соблюдения правил использования воздушного пространства и безопасной эксплуатации. Для проведения аэрофотосъёмки и получения разрешительной документации целесообразно использовать систему «Небосвод» (<https://skyarc.ru/>), предоставляющую информационное обеспечение полётов БАС.

**В третьей главе «Обоснование технико-технологических параметров беспилотных авиационных систем сельскохозяйственного назначения»** выполнено теоретическое обоснование конструктивно-технологических параметров БАС, разработаны БВС для мониторинга сельскохозяйственных биообъектов, подвесы для крепления аэрофотосъёмочного оборудования, система для исследования процесса электростатической подзарядки рабочей жидкости и программное обеспечение для подготовки данных при обучении нейронных сетей, и автоматизации оценки состояния сельскохозяйственных культур.

В результате анализа нормативно-технической документации, конструктивных особенностей БВС и агротехнологических требований выявлено, что разработка сельскохозяйственных БАС должна осуществляться в соответствии с российскими стандартами (ГОСТ Р 59518-2021, ГОСТ Р 59519-2021, ГОСТ Р 59517-2021, ГОСТ Р 56122, ГОСТ Р 59519, ГОСТ Р 59519, ГОСТ Р МЭК 61326-1-2014).

Сформулированы новые термины и определения для сельскохозяйственной беспилотной авиационной системы, которая определяет вид технологических операций: сельскохозяйственная беспилотная авиационная система мониторинга (СХБАСМ), сельскохозяйственная беспилотная авиационная система опрыскивания (СХБАСО).

Определены требования к составным компонентам сельскохозяйственной беспилотной авиационной системы для выполнения технологических операций по аэросъёмке и опрыскиванию посевов с борта БВС. Установлен требуемый размер наземных контрольных точек – 40×40 см, которые позволят корректировать центра фотографирования при высоте съёмки до 120 метров, что позволит повысить точность цифровых карт.

При разработке подвесов для крепления подвешенного оборудования, необходимо учитывать конструктивно-технологические особенности БВС. Применение подвешенного оборудования существенно влияет на лётные характеристики БВС, так как на винтомоторные группы БВС возрастает нагрузка. Существует правило, при котором обеспечивается стабильность полёта БВС – половинная тяга винтомоторной группы должна быть не меньше взлётной массы всей системы БВС (13):

$$\frac{1}{2} \cdot T_{\text{ВМГ}} \geq M_{\text{БВС}} + M_{\text{подв}} + m_{\text{по}}, \quad (13)$$

где,  $T_{\text{ВМГ}}$  – тяговое усилие винтомоторной группы, г;

$M_{\text{БВС}}$  – масса БВС, г;

$M_{\text{подв}}$  – масса подвеса, г;

$m_{\text{по}}$  – масса подвесного оборудования, г.

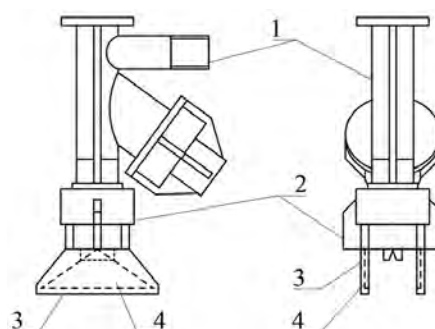
На основании анализа поддерживаемых полётными контроллерами типоразмеров проведена их группировка с учётом целесообразности применения в сельском хозяйстве (таблица 3).

Таблица 3 – Типоразмеры БВС для мониторинга сельскохозяйственных биообъектов

Размер, мм	Применение	Макс. скорость ветра, м/с	Масса, кг	Продолжительность полёта, мин	Грузоподъёмность, кг	Пример серийного БВС
1	2	3	4	5	6	7
150 - 250	Теплицы, селекционные линии	Без-ветренная погода	0,05 - 0,8	до 30	до 0,3	DJI Mini 2
300 - 450	Селекционные поля	10	0,9 - 2,5	до 40	до 1	DJI Phantom 4 pro
500 - 750	Производственные поля	12	3 - 8	до 60	до 3	DJI Matrice 200 v2

Для мониторинга сельскохозяйственных биообъектов в полевых условиях целесообразно применять БВС взлетной массой до 30 кг, радиусом действия 4 км, с типом рамы Х4 (Н4, V4), с размером рамы 300-750 мм, сочетающие достаточную грузоподъёмность для подвесного оборудования и способность выполнять полётные задания в автоматическом режиме. Использование одновременно двух камер предполагает наличие электропитания в диапазоне 5-25,2 В, 1-3 А от бортовой сети БВС, конструкция подвеса должна обеспечивать угол наклона камер при аэрофотосъёмке –  $90^{\circ}$  (в надир) или близкий к нему.

Проведено обоснование параметров и разработана схема системы электростатической подзарядки рабочей жидкости. Система электростатической подзарядки рабочей жидкости позволяет в заданном диапазоне входных параметров (давление насоса, размеры капель, напряжение) определить величину напряжения на электродах форсунки, при котором плотность оседания рабочей жидкости на поверхности будет максимальной. Для формирования плоского факела распыла применены форсунки типа ST 110-0,15, обеспечивающие размер капель 100-250 мкм. Схема распылителя с электродом показана на рисунке 16.



1 – распылитель; 2 – форсунка;  
3 – высоковольтный электрод;  
4 – обкладка электрода  
Рисунок 16 – Распылитель с установленным на форсунку электродом

Плоская струя жидкости распадается на капли, которые в последствии несут электрический заряд. Исходя из этого, заряд индукции на поверхности плоской струи

жидкости рассчитывается для заряда конденсатора с параллельными пластинами. Для плоских конденсаторов существует следующее соотношение, определяющее емкость (14):

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi k d'} \quad (14)$$

где,  $C$  – емкость пластины электрода, Ф;

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость воздуха;

$S$  – площадь перекрытия электрода и плоской струи жидкости, м<sup>2</sup>;

$k$  – постоянная электростатической силы;

$d'$  – расстояние между электродом и плоской струей жидкости, м.

Расчеты показывают прямую зависимость заряда, индуцируемого на поверхности струи жидкости от напряжения на электроде. Наибольшее значение индуцируемого заряда получено при значении напряжения на электроде 10 кВ.

Выполнено обоснование конструктивно-технологических параметров и

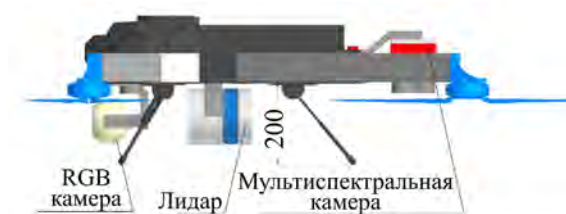


Рисунок 17 – Компоновочная схема подвесного оборудования

разработаны БВС с размерами рамы 750 мм, 300 мм, 150 мм для цифрового мониторинга сельскохозяйственных биообъектов. БВС с размером рамы 700-750 мм относится к среднему классу. Данные БВС универсальны для выполнения задач мониторинга селекционных и производственных полей. Обоснованы материалы для несущей

платформы и лучей: выбраны карбон и алюминиевый сплав Д16Т, создана компоновочная схема (рисунок 17).

Полётный контроллер NEX PixHawk 2.1 Cube Orange был выбран на основе проведенного анализа элементной базы БВС. Выбор обусловлен соответствием технических характеристик полётного контроллера требованиям, предъявляемых к системе мониторинга. Проведена сборка БВС, конструкция которого позволяет установить различное подвесное оборудование (рисунок 18). В таблице 4 представлены технические характеристики.



1 – приемник с телеметрией; 2 – рама с силовой частью и пропеллерами; 3 – полётный контроллер; 4 – модуль геопозиционирования; 5 – аккумулятор; 6 – плата разводки питания; 7 – FPV камера; 8 – пульт управления

Рисунок 18 – Общий вид платформы БВС

Таблица 4 – Технические характеристики БВС

Показатель	Значение
1	2
Тип БВС	V4
Диаметр платформы по осям двигателей, мм	750
FPV камера, Мп	3
Дальность полёта, км	до 10
Длительность полёта, мин	40
Масса БВС, кг	3

За разработку БВС типоразмера 750 мм получена золотая медаль на Всероссийской агропромышленной выставке «Золотая осень – 2021».

Разработка российского аналога широко применяемых электродвигателей Tarot MT 2204/2300KV на БВС типоразмера 300-450 мм является важным шагом для обеспечения технологической независимости отечественного беспилотного рынка. Изготовлен бесколлекторный двигатель с типоразмером статора 2204, диаметром – 22 мм, высотой – 4 мм, константой  $K_v$  – 2300. В качестве материала выбран дюралюминий, который обеспечивает малую массу при одинаковых размерах со стальными изделиями. В роторе установлено 14 неодимовых магнитов N92. Обмотка осуществлена по схеме звезда, с сечением провода 0,2 мм, сопротивление обмоток – 0,172 Ом. По результатам сборки получен экспериментальный образец бесколлекторного электродвигателя (рисунок 19). На основе разработанных двигателей и выбранных компонентов разработан БВС с размером рамы 300 мм для мониторинга селекционных полей (рисунок 20). Основные характеристики представлены в таблице 5.



Рисунок 19 – Бесколлекторный двигатель в сборе

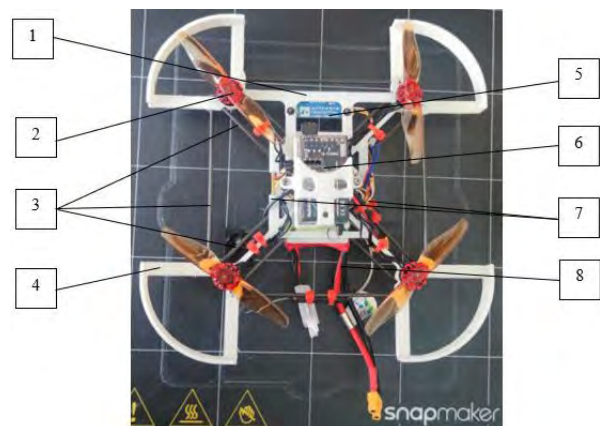


Рисунок 20 – БВС с размером рамы 300 мм для мониторинга селекционных полей

Таблица 5 – Характеристики БВС с размером рамы 300 мм

Показатель	Значение
1	2
Масса БВС с аккумуляторной батареей, кг	0,75
Тяговое усилие винтомоторной группы, Н	13,2
Максимальная взлетная масса, кг	0,8
Дальность полёта, км	до 5
Время полёта, мин	до 20

Применение мини дронов в условиях закрытого грунта и на селекционных линиях позволит автоматизировать мониторинг, анализ и уход за растениями. Важным фактором для выполнения полётов в пространственно-ограниченных условиях остается обеспечение точного позиционирования. Для снижения массы управляющей электроники был выбран HappyModel Crazybee F4 V3 типоразмера All-In-One (AIO), компоненты которого размещены на одной плате. Разработан программный код для поддержки датчика высоты и позиционирования в системе управления полётом, обеспечивающий стабильный полёт БВС при отсутствии сигнала GPS/ГЛОНАСС. Общий вид собранного БВС представлен на рисунке 21.



- 1 – рама; 2 – винтомоторная группа;  
 3 – армирующие карбоновые прутки;  
 4 – защита винтомоторной группы;  
 5 – сенсор Optical Flow & LIDAR Sensor;  
 6 – стек приемника и полётного контроллера AIO;  
 7 – разъемы отладчика;  
 8 – АКБ с отсеком

Рисунок 21 – БВС с размером рамы 150 мм

За разработку БВС типоразмера 150 мм получена серебряная медаль на Всероссийской агропромышленной выставке «Золотая осень – 2024».

Представленные БВС для мониторинга сельскохозяйственных биообъектов были разработаны с непосредственным участием автора настоящей работы на базе ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и используются в качестве учебных образцов в образовательном процессе в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и в Калужском филиале ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

В соответствии с требованиями разработаны подвесы для установки мультиспектральных камер Tetracam ADC Micro, Parrot Sequoia (рисунок 22), MicaSense Altum и лазерного флуориметра с компьютером на борт серийных БВС DJI Phantom 3 (Патент RU 2752037 C1), Inspire 1, Advanced, Phantom 4 Pro (2728846 C1), Matrice 200 v2. Подвесы учитывают датчики БВС, позволяют регулировать угол наклона камер, обеспечивают электропитание с борта БВС. Подвесы позволяют осуществлять аэрофотосъемку сельскохозяйственных культур с двумя камерами на борту. Разработанные подвесы были испытаны в ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и внедрены в ИСА – филиал ФГБНУ ФНАЦ ВИМ в Рязанской области и ФГБНУ «Федеральный научный центр зернобобовых и крупяных культур» в Орловской области. Получены золотые медали на Всероссийских агропромышленных выставка «Золотая осень – 2019» и «Золотая осень – 2020».



Рисунок 22 – Подвес для БВС DJI Phantom 4 Pro

Разработка крепления лазерного флуориметра с компьютером на борт DJI Matrice 200 v2 выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития по тематике «Разработка экологически безопасных и энергоэффективных спектральных и лазерных технологий для увеличения продуктивности сельскохозяйственных растений и животных» в рамках Соглашения от «7» октября 2020 г. № 075-15-2020-774.



Рисунок 23 – Общий вид экспериментальной системы

Выбрано оборудование и разработана экспериментальная система для исследования процесса электростатической подзарядки рабочей жидкости (рисунок 23). Для экспериментальной установки было выбрано следующее оборудование: источник высокого напряжения ИВНР-50/5(+/-); цифровой мультиметр MS8236 EKF Professional; ноутбук; бесколлекторный водяной насос Eagle Power WA3510 12s с регулятором оборотов; сервотестер HJ Digital; блок аккумуляторов Tattu 16000 mAh 6S; лабораторный источник питания ELEMENT 305D; опрыскиватель с форсункой ST 110-015.

Обучение сверточных нейронных сетей глубокого обучения проводится на подготовленных данных (изображениях) высокого качества с точной разметкой

целевых зон. Для их обучения разработаны специализированные программные решения, направленные на автоматизацию процессов подготовки данных. Программное обеспечение «ВИМ.Нарезка» предназначено для нарезки изображений высокого разрешения, полученных в результате аэрофотосъёмки (№ 2024682640). Программа «ITS.ImageCroper» позволяет упростить процесс сортировки и подготовки большого массива данных (фотографий), используемых при обучении нейронной сети (№ 2021614841) (рисунок 24). Программа «ITS.ImagePrepare» используется для подготовки данных при обучении сегментационной нейронной сети (№ 2023666875).

Программы «ITS.ImageCroper» и «ITS.ImagePrepare» использовались в процессе разметки изображений для обучения классификационных нейронных сетей и в создании обучающих масок изображений для сегментационной нейронной сети при выполнении НИОКР по теме «Разработка прототипа комплекса программных средств для определения площади поверхности листа растений, оценки состояния, с геопривязкой» в рамках Договора № 4120ГС1/68646 от 16.07.2021. Их использование позволило упростить работу по выделению целевого сегмента, ускорить и автоматизировать обработку изображений.

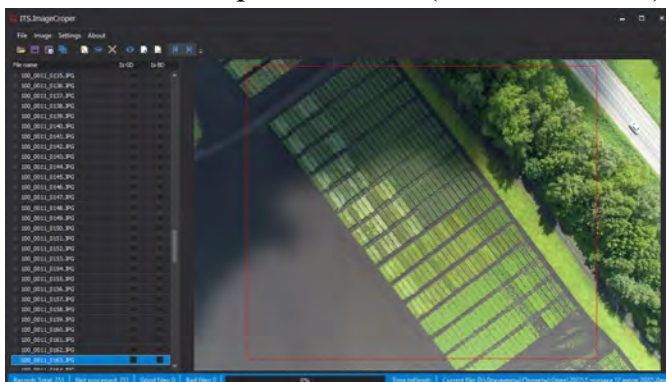


Рисунок 24 – Интерфейс программного обеспечения «ITS.ImageCroper»

Разработанный программный комплекс «ВИМ.Анализ растений» (№ 2025617460) модульной архитектуры включает три модуля: анализ всхожести растений сои (№ 2024617876), прогнозирование содержания жира в семенах растений сои (№ 2024617765), обнаружение полегания зерновых культур (№ 2025616502). Интерфейс разработанного программного комплекса для анализа состояния растений представлен на рисунке 25.

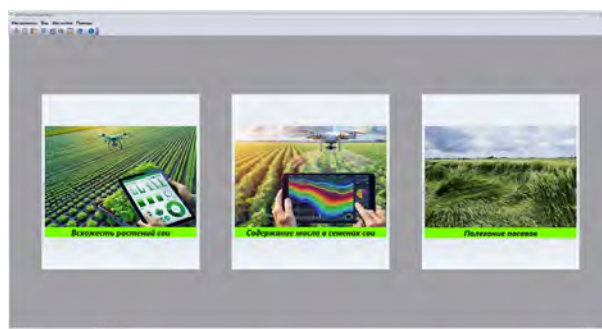


Рисунок 25 – Интерфейс программного обеспечения «ВИМ.Анализ растений»

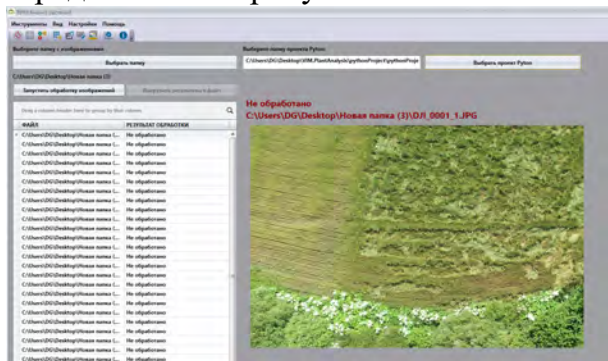


Рисунок 26 – Интерфейс модуля полегания посевов

Модуль полегания посевов (рисунок 26) создан на основе обученной нейронной сети ResNet50 v2. Была спроектирована архитектура ResNet50 V2, включающая 16 блоков, 164 слоя. При сборе и подготовке данных для обучения ResNet50 V2 создана база аэрофотоматериала зерновых культур с полеганием и без, собранных в трех регионах России на протяжении 4 лет (с 2020 по 2022 гг. и в 2024 г.) в количестве 1 300 изображений с полеганием и 1 680 без полегания. Обучение и тестирование нейронной сети выполнялось по ГОСТ Р 70462.1-2022/ISO/IEC TR 24029-1-2021. Обученная

нейронная сеть обеспечила точностью распознавания 98,44 % при средней скорости работы 13,7 мс, что свидетельствует о достаточном быстродействии нейронной сети.

Проведены расчеты временных ресурсов, необходимых для фиксации мест полегания зерновых культур традиционным способом и с помощью разработанного модуля по определению полегания зерновых культур (15). Расчеты проведены при изучении участка посевов размером 100 на 100 м и площадью 1 га.

$$\begin{aligned} T_{\text{эф}} &= T_{\text{традиц}} - T_{\text{модуль}}, \\ T_{\text{эф}} &= 120 - 34 = 86 \text{ мин} \end{aligned} \quad (15)$$

где,  $T_{\text{эф}}$  – разница временных ресурсов, необходимых для фиксации мест полегания зерновых культур, мин;

$T_{\text{традиц}}$  – время на использование традиционного метода, мин;

$T_{\text{модуль}}$  – время на использование разработанного модуля, мин.

Использование разработанного модуля определения полегания зерновых культур по данным аэрофотосъемки с БВС способствует сокращению временных затрат по сравнению и ручным методом более чем в 2 раза в зависимости от исследуемой площади.

**В четвертой главе «Экспериментальные исследования технологического процесса цифрового мониторинга и беспилотных воздушных судов в сельскохозяйственных процессах»** приведена программа и методика экспериментальных исследований, представлены результаты исследований беспилотных воздушных судов, элементов полезной нагрузки, технических средств и технологического процесса цифрового мониторинга сельскохозяйственных биообъектов.

Аэрофотосъемка сельскохозяйственных биообъектов осуществлялась с помощью системы мониторинга на базе БВС DJI Matrice 200 v2 с установленным ГНСС приемником Topodrone PPK на борту (рисунок 27), ГНСС приемника EMLID Reach RS2, наземных контрольных точек. БВС оснащен модифицированной камерой видимого диапазона DJI Zenmuse x4s. Подключение EMLID Reach RS2 осуществлялось к ближайшей базовой станции в пределах 60 км. Сбор мультиспектральных данных проводился с помощью камеры MicaSense Altum с датчиком DLS 2 и разработанного подвеса для ее крепления на борт БВС.

Аэрофотосъемка проводилась в соответствии с ГОСТ Р 58854-2020. Полеты осуществлялись в программе DJI Pilot, в этой же программе создавались полётные задания. Сбор данных проводился согласно требованиям высокоточной аэрофотосъемки.

Постобработка ГНСС измерений выполнялась в программе Topodrone PPK Post Processing. Фотограмметрическая обработка данных проводилась в программах Agisoft Metashape, Pix4DMapper и Pix4DFields. После первичной аэрофототриангуляции рассчитывалась средняя квадратичная ошибка по каждой оси  $RMSE_x$ ,  $RMSE_y$ ,  $RMSE_z$  и проекта в целом  $RMSE_p$  (12). Для каждого полёта создавались цифровые карты и модели в зависимости от задач. В исследовании для



1 – пульт управления;  
2 – БВС DJI Matrice 200 v2 с ГНСС L1/L2 приёмником;  
3 – ГНСС приёмник EMLID Reach RS2  
Рисунок 27 – Система мониторинга сельскохозяйственных биообъектов

обработки данных аэрофотосъёмки использовалась рабочая станция с конфигурацией для обработки средних и больших проектов в соответствии с системными требованиями программного обеспечения.

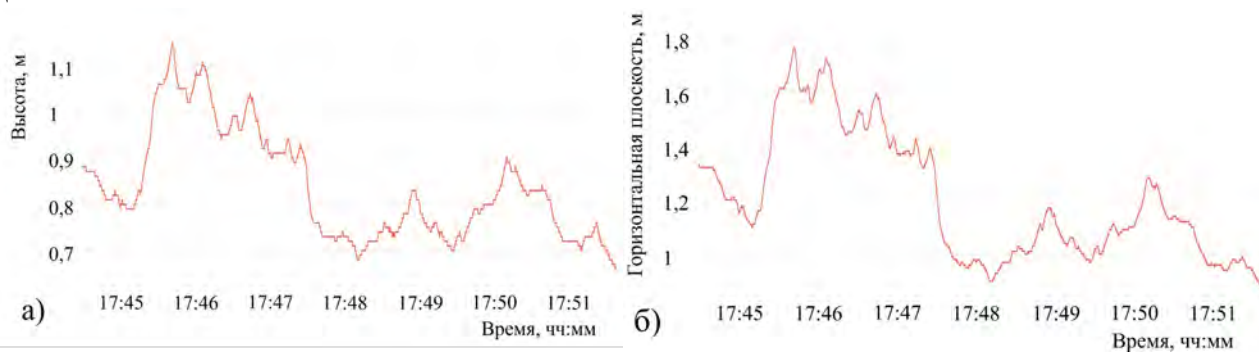
Испытания БВС с размером рамы 750 мм (рисунок 28) были направлены на



Рисунок 28 – БВС с размером рамы 750 мм

проверку выполнения полётного задания по следующим пунктам: предполётная подготовка, первый запуск, проверка управляемости, проверка автономных функций. Устойчивость БВС к внешним воздействиям определяли при взлете в ветренную погоду со скоростью воздушного потока 5-7 м/с. После взлёта на высоту 8 м оценивали удержание позиции с помощью показаний на приборах указателя курса и авиагоризонта. Среднее отклонение

по высоте составило 0,84 м, в плане – 1,2 м (рисунок 29), что находится в допустимом диапазоне отклонения по GPS/ГЛОНАСС в 1-3 м.



а) по высоте; б) в плане

Рисунок 29 – Графики позиционирования БВС в плане и по высоте

На последнем этапе в БВС было загружено предварительно созданное тестовое полётное задание с параметрами: площадь – 5,5 Га; высота полёта – 40 м; скорость полёта – 3,2 м/с; продольное/поперечное перекрытия – 85%. В таблице 6 представлены результаты этапов выполнения полётного задания. БВС успешно выполнил полётное задание в автоматическом режиме и может применяться для мониторинга сельскохозяйственных биообъектов.

Таблица 6 – Параметры оценки БВС с размером рамы 750 мм по 4 этапам

Критерий	Результат	Норматив
1	2	3
Контрольный предполётный список	Нет ошибок	Нет ошибок
Среднее отклонение по высоте, м	0,84	$\leq 3$
Среднее отклонение в плане, м	1,2	$\leq 3$
Потери связи, раз	0	0
Время выполнения задания	25 мин 29 сек	–

Проведены испытания бесколлекторного двигателя и БВС с размером рамы 300 мм. Лабораторные испытания бесколлекторного двигателя заключались в сравнении следующих показателей разработанного бесколлекторного двигателя с его

аналогом: падение напряжения, сила потребляемого тока, частота вращения под нагрузкой и тяговое усилие. Для проведения лабораторных испытаний был разработан стенд ротационного типа. По окончании измерений данные усреднялись.

При увеличении частоты ШИМ сигнала увеличение тягового усилия

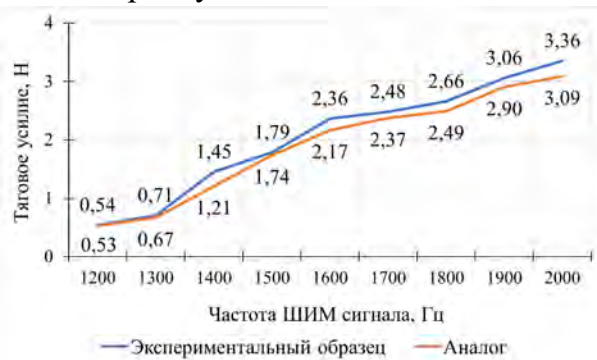


Рисунок 30 – График зависимости тягового усилия от частоты ШИМ сигнала

происходило плавно, без рывков (рисунок 30). По сравнению с аналогом разработанный бесколлекторный двигатель имел на 0,29 Н больше тяги, чем у аналога в промежутке от 1500 до 2000 Гц, что соответствует уровню оборотов двигателя в рабочих режимах.

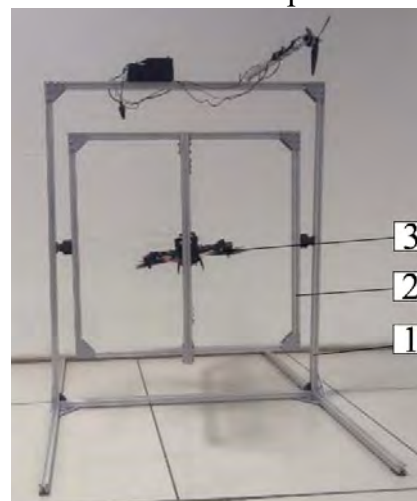
Облегчение конструкции ротора и замена стального кольца на алюминиевое позволило снизить инерцию вращающихся масс и падение напряжения на 0,2 В, которое расходуется у аналога на

преодоление момента инерции. Облегчение ротора привело к снижению потребления тока у экспериментального образца по сравнению с аналогом на 0,16 А. Снижение массы и момента инерции ротора увеличило его частоту вращения на 200 мин<sup>-1</sup>.

Были проведены лабораторные испытания несущей платформы БВС, которые включали в себя оценку влияния вибраций от винтомоторных групп через лучи на систему стабилизации БВС. На несущую платформу установлены разработанные бесколлекторные двигатели, пропеллеры диаметром 6 дюймов, полётный контроллер с IMU сенсором GY-6500 на чипе MPU6500, регуляторы оборотов и аккумуляторная батарея. Для оценки влияния вибрации винтомоторных групп на систему стабилизации БВС разработан лабораторный стенд (рисунок 31).

По результатам испытаний установлено, что: критические углы показания отклонений от начального состояния вызванных вибрацией лучей минимальны, для гироскопа – 1,169 мин<sup>-1</sup>, для акселерометра – 0,139 м/с<sup>2</sup>; после стабилизации из критического угла гироскоп имел расхождение в показаниях от начального положения 2,661 мин<sup>-1</sup>; акселерометр подвергся влиянию затухающих колебаний и разность отклонения от начального положения – 1,527 м/с<sup>2</sup>. Данные показания укладывались в погрешность IMU сенсора GY-6500, происходило сглаживание на программном уровне и обеспечивалась стабилизация полёта.

Проведены испытания БВС с размером рамы 150 мм для оценки стабильного полёта без сигнала GPS/ГЛОННАС. Был разработан программный код для согласования датчика измерения расстояния, видео-поточкового сенсора и полётного контроллера. Проведенные измерения высоты от плоскости пола до датчика дальнометра показали, что наибольшее отклонение абсолютной погрешности



1 – рама; 2 – трёхосевой подвес; 3 – несущая платформа с установленными компонентами  
Рисунок 31 – Общий вид лабораторного стенда

составило 0,3 см, что находится в рамках допустимой погрешности. Была проведена оценка функционирования системы после внесения изменений в программном коде на расстоянии 50-100 см до сенсора от контрастной поверхности (рисунок 32). Детектор Sanny применен для исключения шумов при определении контуров. Для получения данных о пройденном расстоянии на контрастную панель нанесена разметка с шагом 50 мм. БВС устанавливалось на высоте не менее 250 мм от панели для исключения шумов и перемещалось параллельно на 100 мм по горизонтальным осям, совмещая центр пересечения лучей БВС и риски нанесенной шкалы. Средняя погрешность измеренного значения пройденного пути относительно реального составила 1,71%, и не превысила 5% уровень статистической значимости.

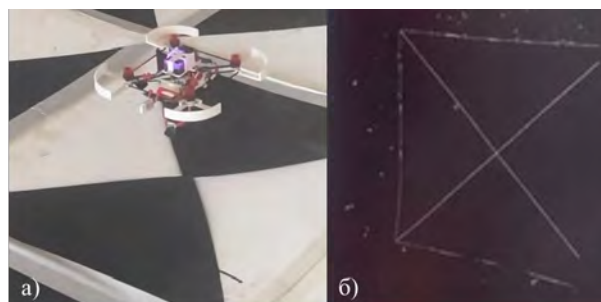
Результаты испытаний оценки удержания позиции по контрастным меткам показали, что БВС вело себя стабильно при удержании позиции, линейные перемещения БВС от центра точки привязки в плане составили не более 10 мм, по высоте не превышали 8 мм. При перемещении БВС следовало за передвижением контрастной панели, при этом время отклика составило менее 1 с. Система позиционирования позволяет эксплуатировать БВС в условиях закрытого грунта операторам с начальным уровнем пилотирования, а также применять в качестве модели для обучения.

Проведенные исследования элементов полезной нагрузки показали, что применение разработанных подвесов для мультиспектральных камер на серийных БВС позволяют проводить аэрофотосъемку одновременно в двух диапазонах: видимом и спектральном. Был проведен ряд полетов в полевых условиях на высоте 70 м с поперечным и продольным перекрытиями 75% (таблица 7).

Таблица 7 – Результаты испытаний полезного времени полёта БВС

№	Платформа	Время полёта, мин	Исследуемая площадь, га
1	2	3	4
1	DJI Inspire 1 с RGB камерой Zenmuse X3	15	11
	DJI Inspire 1 с мультиспектральной камерой Parrot Sequoia и с подвесом	11	5
2	DJI Phantom 4 Pro	16	12
	DJI Phantom 4 Pro с мультиспектральной камерой Parrot Sequoia и дополнительным источником питания	9	4
	DJI Phantom 4 Pro с мультиспектральной камерой Parrot Sequoia и подвесом RU 2 728 846 C1	12	6
3	DJI Matrice 200 v2 с RGB камерой Zenmuse x4s	10	20
	DJI Matrice 200 v2 с мультиспектральной камерой MicaSense и подвесом	20	25

Расчеты продолжительности полёта для трех комплексов БВС с камерами RGB и мультиспектральными позволяют заранее спланировать полётное задание и



а) полёт БВС над контрастной панелью;  
б) захват видеопотока с помощью детектора Sanny

Рисунок 32 – Оценка работы видеопотокового сенсора

определить требуемое количество аккумуляторных батарей для аэрофотосъёмки. Таким образом, данные комплексы демонстрируют лучшее соотношение времени полёта, площади покрытия и типа собираемых данных, что делает их эффективным решением для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур.

Исследования процесса электростатической подзарядки рабочей жидкости сводилось к тому, чтобы в заданном диапазоне давления насоса, обусловленном его характеристиками, типа форсунки и величины напряжения на электроде найти такое соотношение параметров, при котором плотность оседания капель рабочей жидкости будет максимальной. В соответствии с программой проведения экспериментальных исследований выделены следующие факторы взаимодействия: давление насоса и напряжение на электроде. В качестве отклика принимался ток на коллекторе (рисунок 33).

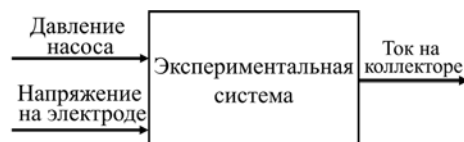
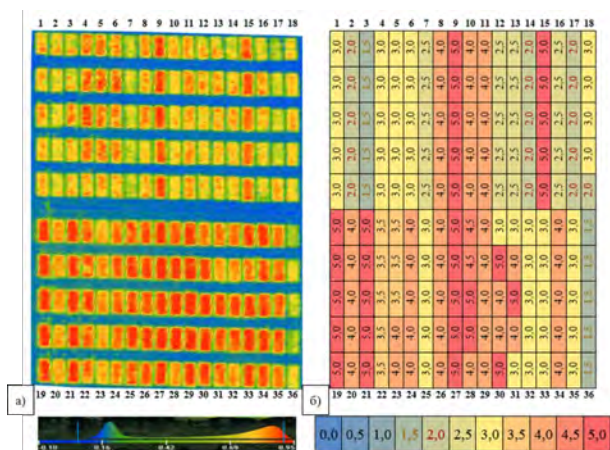


Рисунок 33 – Схема модели взаимодействия факторов лабораторной установки

Для определения зависимости силы тока, индуцируемого на коллекторе в результате электростатической подзарядки распыляемой жидкости, использовали D-оптимальный план, который позволил определить коэффициенты нелинейного уравнения регрессии при минимизации объема эллипсоида рассеивания с более точным описанием поверхности отклика. Отношение заряда капли к ее массе было определено путем отношения общего заряда израсходованной за этап эксперимента жидкости к ее массе при значениях давления 0,2...0,4 МПа и напряжения на электроде 8...10 кВ. Установлено, что наибольшая плотность оседания капель  $A_q = 9,4229$  мКл/кг, достигалась при давлении насоса 0,2 Мпа и напряжении на электроде 10 кВ, что делает систему перспективной для применения на БВС при реализации технологических процессов в системе сельскохозяйственных операций.

Исследование использования вегетационных индексов для оценки перезимовки озимой пшеницы в селекционном процессе направлено на сравнение традиционного



а) карта вегетационного индекса NDVI;  
б) бальная оценка перезимовки озимых культур

Рисунок 34 – Оценка состояния посевов озимой пшеницы, весна 2021 г.

метода глазомерной оценки по зимостойкости селекционного материала с возможностями мультиспектральной аэрофотосъёмки, позволяющих повысить точность эксперимента селекционера, исключив субъективный фактор. Исследование проводилось на селекционных посевах озимых культур ФГБНУ ФНЦ ЗБК в 2021 г., площадь посева – 3,24 га.

Корреляционный анализ данных со 180 делянок вегетационных индексов (NDVI, NDRE, ClGreen) и глазомерной бальной оценки перезимовки озимых культур выявил существенную связь между ними ( $r > 0,7$ ) (рисунок 34).

Проведенное исследование позволило выявить сорта и селекционные линии, существенно превосходящие местный стандарт

(сорта озимой пшеницы Skipetr). Метод рекомендуется для тестирования сортового материала озимых зерновых культур перед передачей сорта на государственное испытание.

Исследования оценки полевой всхожести растений сои по данным мультиспектральной аэрофотосъёмки проведены на селекционных полях ИСА – филиал ФГБУ ФНАЦ ВИМ в 2020 г., Рязанская область, площадь посева – 1 га и ФГБНУ ФНЦ ЗБК в 2021 и 2022 гг., площадь посева – 1,72 га и 2,75 га соответственно. В исследовании учитывались данные 1460 участков. Были созданы вегетационные карты NDVI, NDRE, ClGreen.

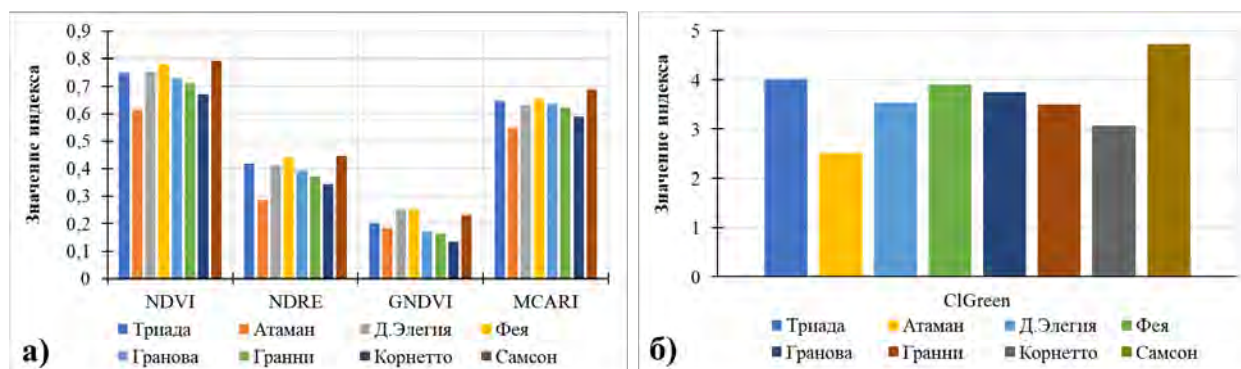
При работе с данными о всхожести все данные за три года были разделены на две группы: тестовые и проверочные. На основе данных тестовых участков было сформировано 4 основных диапазона по правилу Стерджеса (таблица 8).

Таблица 8 – Соотношение диапазонов всхожести и значений вегетационных индексов

Группа всхожести	Диапазон всхожести, %	Диапазон NDVI	Диапазон NDRE	Диапазон ClGreen
1	2	3	4	5
Очень низкая всхожесть	0-12,84	0-0,26	0-0,09	0-0,7
Низкая всхожесть	12,85-31,14	0,27-0,31	0,1-0,13	0,71-1,01
Средняя всхожесть	31,15-58,59	0,32-0,37	0,14-0,18	1,02-1,48
Высокая всхожесть	58,6-100	0,38-0,5	0,19-0,3	1,49-2,5

Значения MAPE (Average Absolute Percentage Error) не превышали 10% для вегетационных индексов NDVI, ClGreen и 18% для вегетационного индекса NDRE. Общий показатель MAPE за каждый год также не превышал 10%, что свидетельствовало о высоких результатах точности оценки всхожести с использованием мультиспектральных данных.

Проведены исследования созревания сортов ярового ячменя с помощью мультиспектральных данных. По средним значениям вегетационных индексов построены гистограммы по каждому из исследуемых сортов (рисунок 35). По гистограммам видно, что сорт Атаман имеет наименьшие средние значения по NDVI, NDRE, MCARI и ClGreen. Средние значения вегетационного индекса GNDVI сортов Гранова, Гранни и Корнетто ниже средних значений эталонного сорта Атаман, что говорит о их высокой скорости увядания относительно сорта эталона.



а) NDVI, NDRE, GNDVI, MCARI б) ClGreen

Рисунок 35 – Средние значения вегетационных индексов сортов ярового ячменя

На основе исследований разработан алгоритм для ранжирования исследуемых сортов, позволяющий сократить время, необходимое для изучения фенотипов при выводе новых сортов ярового ячменя.

Исследования состояния растений картофеля на основе мультиспектральной аэрофотосъёмки проводились в фазы начало цветения (08.07.2022) и максимальный прирост клубней (03.08.2022). Были созданы ортофотопланы, спектральные карты (blue, green, red, rededge, NIR) и карты вегетационных индексов (NDVI, NDRE, CIGreen, GNDVI) после каждого полёта (рисунок 36). На 8 июля отклонение значений вегетационных индексов

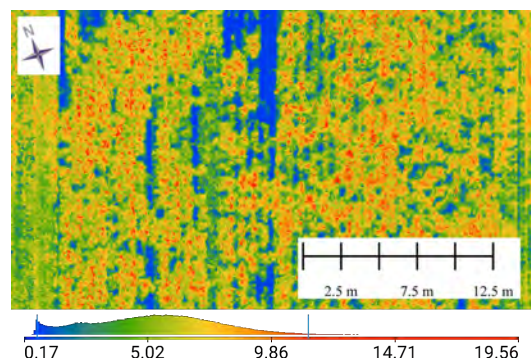


Рисунок 36 – Фрагмент вегетационной карты CIGreen, 03.08.2022

для здоровых и зараженных растений составило: NDVI – 4,6%, NDRE – 8,1%, CIGreen – 19,0%, GNDVI – не выявлено существенных различий. На 3 августа: NDVI – 13%, NDRE – 27%, CIGreen – 54%, GNDVI – 18%. На основе исследования разработан метод для проведения экспресс диагностики состояния растений картофеля.

Данное исследование было выполнено при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития по тематике «Разработка экологически безопасных и энергоэффективных спектральных и лазерных технологий для увеличения продуктивности сельскохозяйственных растений и животных» в рамках Соглашения от «7» октября 2020 г. № 075-15-2020-774.

Исследования по идентификации растений борщевика Сосновского направлены на разработку метода для его раннего обнаружения по данным мультиспектральной аэрофотосъёмки с БВС. Территория исследования включала 146 земельных участков, общей площадью 305 га, расположенные в Московской области. В рамках исследования было выбрано 4 экспериментальных участка и создано 19 цифровых карт (ортофотоплан, 5 спектральных карт, 13 вегетационных карт) по каждому из них. Пользовательский индекс BS1 выведен эмпирическим путем.

На исследуемых участках расставлялись наземные контрольные точки по трем категориям трава, рядом с деревьями и растениями борщевика Сосновского. Выборка составила 1080 точек за три года (2020, 2021, 2022), по 120 точек в каждой категории. Для распознавания наземных контрольных точек на ортофотоплане был написан скрипт на языке Python 3.10.5 (№ 2024616648), использующий нейронную сеть ResNet50 проекта DeepForest.

Сравнение диапазонов значений вегетационных индексов для борщевика Сосновского, травы и деревьев показало, что большинство диапазонов пересекаются друг с другом. На основе полученных диапазонов выявлены минимальные значения, в большей степени характерные для растений борщевика Сосновского:  $G > 0,14$ ;  $MCARI > 0,76$ ;  $BS1 > 0,10$ . Для травяного покрова характерны значения:  $0,02 < G < 0,13$ ;  $0,49 < MCARI < 1,08$ ;  $0,08 < BS1 < 0,18$ , для деревьев:  $0,06 < G < 0,12$ ;  $0,55 < MCARI < 1,05$ ;  $0,06 < BS1 < 0,10$ .

Используя разработанный метод борщевик Сосновского был обнаружен на 147 га, что соответствует 48% исследуемой площади. Выявленные места произрастания борщевика Сосновского были переданы профильным организациям для дальнейшего уничтожения сорняка до осыпания семян.

**В пятой главе «Технико-экономические исследования беспилотных авиационных систем в производственных условиях»** проведена экономическая оценка использования беспилотных авиационных систем в сельском хозяйстве.

Обзор научных источников, государственных стандартов, предметом которого стал поиск методик экономической оценки применения БАС в рамках АПК, показал низкий уровень разработанности данной темы. В связи с этим разработан метод экономической оценки применения БАС в сельскохозяйственных процессах, основанный на определении затрат на закупку и эксплуатацию БАС в расчёте на 1 га,  $R_{\text{БАС}}$ , руб./га, определяется по формуле (16):

$$R_{\text{БАС}} = \frac{F_o + N_{pt} + C_{dc} + B_d + A_d + (T_{log} \cdot M_d)}{G}, \quad (16),$$

где,  $F_o$  – фонд оплаты труда специалистов, обслуживающих и организующих эксплуатацию БАС в хозяйстве, руб.;

$N_{pt}$  – сумма уплачиваемых налогов на фонд оплаты труда, руб.;

$C_{dc}$  – амортизационные отчисления, руб.;

$B_d$  – стоимость комплекса БАС, руб.;

$A_d$  – расходы на материалы и услуги, необходимые для подготовки и эксплуатации БАС, руб.;

$T_{log}$  – транспортные расходы, связанные с перемещением БАС на место осуществления производственных процессов, руб.;

$M_d$  – совокупное количество дней мониторинга БАС, ед.;

$G$  – банк земли сельхозтоваропроизводителя, на котором применяются БАС, га.

В результате затраты на высокоточный мониторинг сельскохозяйственных биообъектов с БАС на базе DJI Matrice 200 v2, с камерами на борту DJI Zenmuse x4s, Micasense Altum, на площади 1000 га составят 3 739 руб./га. С увеличением площади мониторинга сельскохозяйственный угодий затраты на использование БАС уменьшаются. Данный метод направлен на совершенствование управленческого учёта и позволяет специалистам и сельскохозяйственным предприятиям комплексно оценивать применение БАС.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге выполненных исследований достигнута основная цель и получены следующие результаты:

1. Проведенный ретроспективный анализ системы управления полётом БАС и средств аэрофотосъёмки выявил скачкообразный характер развития, обусловленный техническими, политическими, социальными и экономическими факторами. Выполненная периодизация включает 6 этапов и учитывает изменение типа камер, системы управления полётом и конструкций летательных аппаратов:

– 1858-1908 – первые экспериментальные разработки аэрофотоаппаратуры. Воздушные шары были основным средством для проведения съёмки. Разработаны первые портативные камеры и их крепления к летательным аппаратам.

– 1909-1945 – аэрофотосъёмка с летательных аппаратов. Происходило активное развитие системы управления полётом: от управления в пределах прямой видимости до полёта с заданными параметрами курса, высоты и значительным увеличением дальности полёта до 300 км. Развитие аэрофотоаппаратуры носило скачкообразный характер. Были созданы высокоскоростные плёночные фотоаппараты, со стандартами формата кадра 9×9 см, 13×18 см, 18×18 см, 18×24 см, и жесткие крепления для их установки на борт самолета. Количество кадров не превышало 200 шт. Аэрофотосъёмку стали применять для картирования сельскохозяйственных полей с помощью самолетов гражданской авиации.

– 1946-1979 – становление дистанционного зондирования Земли. Этап сопровождался изменением конструкции летательных аппаратов и развитием в области цветной и спектральной аэрофотосъёмки, а также разработкой средств картографического анализа и началом эры спутникового мониторинга. Отмечена тенденция по увеличению количества кадров на пленке до 630 шт. в середине 1960-х гг. Система управления полётом позволяла совершать взлет и посадку с горизонтальной поверхности и контролировать полёт по радиолокационным приборам с дальностью до 150 км. В сельском хозяйстве стали применять спектральные данные для создания вегетационных карт и решения задач аграрного производства.

– 1980-2012 – зарождение современных беспилотных летательных аппаратов мультироторного типа и развитие цифрового аэрофотоаппарата. Миниатюризация системы управления полётом способствовала появлению и развитию полётных контроллеров, применяемых на «малых» БПЛА взлетной массой до 30 кг. Полётные контроллеры установили стандарты создания БПЛА и программного обеспечения для них, обеспечивая стабильный полёт и дальность до 1 км. Появились цифровые камеры с матрицей нового поколения CMOS, записывающие изображения на кассету или sd-карту, по стандарту сжатия изображений jpeg. Тенденция совершенствования цифрового хранилища позволила записывать изображения от 25 до 2 000 шт. к концу этапа.

– Январь-октябрь 2013 года – становление готовых решений БПЛА. На первый серийный коммерческий БПЛА, взлетной массой до 30 кг, с помощью специального подвеса устанавливалась цифровая камера с разрешением 12 Мп. Система управления полётом обеспечивала функции автопилотирования, но управление камерой отсутствовало. БПЛА использовались в основном для художественной съёмки, но находили применение и в сельском хозяйстве.

– Октябрь 2013 года по настоящее время. Интеграция интеллектуальных функций автопилота в систему управления полётом позволила осуществлять управление БПЛА и камерой со смартфона. В 2016 году были утверждены термины «беспилотное воздушное судно» (БВС) вместо БПЛА и «беспилотная авиационная система» (БАС). Отмечена тенденция увеличения разрешения цифровых камер до 61 Мп и количества записываемых изображений до 14000 шт. Совершенствование системы управления полётом и камер повысило безопасность полёта, позволило создавать цифровые карты сельскохозяйственных угодий и способствовало более активному использованию БАС в сельском хозяйстве.

Дальнейшее развитие будет связано с внедрением искусственный интеллект в систему управления полётом и подвесное оборудование, что обеспечит эффективный

безопасный цифровой мониторинг сельскохозяйственных биообъектов в соответствии с нормативными требованиями, оперативный анализ данных и принятие решений на основе актуальной информации о состоянии посевов.

2. Разработаны и научно обоснованы ключевые аспекты применения БАС в сельском хозяйстве. Представлена классификация БВС по типу, массе и дальности полёта. Разработаны архитектура системы мониторинга на базе БАС взлетной массой до 30 кг и системы управления опрыскивающего БВС. Предложена функциональная схема процесса мониторинга с БАС, дающая целостное представление и структурирующая процесс аэрофотосъёмки сельскохозяйственных биообъектов. Разработаны алгоритмы цифрового мониторинга, обеспечивающие абсолютную погрешность позиционирования до 10 см (XYZ) с использованием наземных опорных точек и до 5 см при проведении высокоточной аэрофотосъёмки. Разработан алгоритм дифференцированного опрыскивания рабочей жидкости на основе карт предписаний. Предложен способ электроподзарядки рабочей жидкости, повышающий плотность осаждения капель рабочей жидкости до 30%. Определены основные параметры аэрофотосъёмки с БАС: продольное и поперечное перекрытия снимков – не менее 75%; высота полёта – 25-150 м; возврат при потере сигнала на высоте от 70 м; предупреждение о заряде батареи – не менее 30%; скорость полёта БВС с камерами DJI Zenmuse x4s и MicaSense Altum – 1 м/с на высоте 30 м и 5 м/с на 150 м; продольное и поперечное перекрытия RGB-камеры в 85% соответствует 75% для мультиспектральной камеры; экспозиция RGB камеры (от -0,3 до 0,0), ISO (100, 200, 400), диафрагма (F/3.2-F/5.6), фиксированное фокусное расстояние, формат кадра (3:2) и скорость срабатывания затвора (1/1600-1/320). Разработано мобильное приложение для определения параметров полётного задания с двумя камерами на борту. Определены технические и технологические требования к цифровому мониторингу в растениеводстве с БВС взлетной массой до 30 кг. Приведены нормативно-правовые аспекты применения БАС в сельском хозяйстве для соблюдения правил использования воздушного пространства и безопасной эксплуатации.

3. Выполнено теоретическое обоснование технико-технологических параметров БАС. Приведены нормативные ссылки на стандарты для разработки БАС сельскохозяйственного назначения, определены требования к составным компонентам БАС, сформулированы новые термины и определения (сельскохозяйственная беспилотная авиационная система мониторинга (СХБАСМ) и сельскохозяйственная беспилотная авиационная система опрыскивания (СХБАСО)) для сельскохозяйственной БАС, определяющие вид технологических операций. Установлены требования к конструктивно-технологическим параметрам БАС для мониторинга: взлетная масса всей системы БВС не должна превышать половинную тягу винтомоторной группы; тип рамы – Х4, Н4, V4 (квадрокоптерная схема); количество винтомоторных групп – 4; размер рамы – 300–750 мм; максимальная взлётная масса – до 30 кг; модульная конструкция с возможностью одновременного использования двух камер; электропитание для камер в диапазоне 5–25,2 В, 1–3 А; радиус действия БВС – не менее 4000 м; рабочий температурный диапазон – от -10 до +45 °С; продолжительность полёта – от 10 минут; угол наклона камер при аэрофотосъёмке – 90° (в надир) или близкий к нему. Разработаны БВС с размерами рамы 750 мм, 300 мм, 150 мм и подвесы для установки мультиспектральных камер и

лазерного флуориметра на борт серийных БВС для цифрового мониторинга сельскохозяйственных биообъектов. Разработана система электростатической подзарядки капель рабочей жидкости. Определено, что наибольшее значение индуцируемого заряда наблюдается при значении напряжения на электроде – 10 кВ. Разработаны программные решения, направленные на автоматизацию процессов анализа состояния сельскохозяйственных культур с применением технологий искусственного интеллекта: программы для обработки аэрофотоснимков (нарезка, разметка, маски), программный комплекс «ВИМ. Анализ растений».

4. В результате экспериментальных исследований определено:

– БВС с размером рамы 750 мм выполнял полётные задания со средними отклонениями от курса 1,2 м в плане и 0,84 м по высоте. У БВС с размером рамы 300 мм с разработанными электромоторами было отмечено снижение падения напряжения аккумуляторной батареи на 0,2 В, уменьшение потребляемой силы тока на 0,16 А, повышение оборотов ротора на 200 мин<sup>-1</sup>, повышение развиваемой тяги на 0,29 Н, значения отклонений гироскопа и акселерометра от начального состояния минимальны – 2,661 мин<sup>-1</sup> и 1,527 м/с<sup>2</sup> соответственно. БВС с размером рамы 150 мм выполнил полёт без GPS/ГЛОНАСС с отклонения до 10 мм в плане и до 8 мм по высоте, с откликом на перемещение – менее 1 с.

– Применение разработанных подвесов для мультиспектральных камер на серийных БВС показало лучшее соотношение времени полёта, площади покрытия и типа собираемых данных. БВС DJI Matrice 200 v2 с двумя камерами за 20 мин. выполнил аэрофотосъёмку 10 га с одним комплектом аккумуляторных батарей, при этом стандартная конфигурация за аналогичное время собирает только RGB данные на площади 16 га.

– Определены параметры системы электростатической подзарядки капель рабочей жидкости: наибольшее значение отношения заряда капли к ее массе – 9,4 мКл/кг при давлении насоса 0,2 МПа и напряжении на электроде 10 кВ.

– Проведенные исследования технологического процесса цифрового мониторинга сельскохозяйственных биообъектов подтверждают эффективность применения мультиспектральной съёмки. Разработан способ оценки перезимовки озимой пшеницы в селекционном процессе на основе вегетационных индексов NDVI, NDRE, ClGreen. Установлена положительная корреляция ( $r > 0,7$ ) между данными наземных и воздушных измерений. Выявлены сорта и селекционные линии, превосходящие местный стандарт (Орловская область, сорт озимой пшеницы Skipetr). Разработаны метод и программное обеспечение оценки полевой всхожести посевов сои по 4 категориям всхожести при средней абсолютной процентной ошибке (MAPE) менее 10% за три года исследований (1460 делянок). Разработан алгоритм оценки сортового разнообразия ярового ячменя на основе индексов NDVI, NDRE, ClGreen, GNDVI и спектральных каналов с длиной волны 475 нм, 560 нм, 668 нм, 717 нм для ранжирования сортов относительно контрольного сорта-стандарта. Разработан алгоритм для экспресс-диагностики состояния растений картофеля и определены значения спектральных каналов blue, green, red, rededge, NIR и вегетационных индексов NDVI, NDRE, ClGreen, GNDVI, характерные для здоровых и зараженных растений картофеля. Разработан метод по картированию и оценке состояния растений борщевика Сосновского. Метод включает в себя алгоритм, использующий

спектральный GREEN (зеленый) канал, индексы NDVI, MCARI и созданный пользовательский индекс BS1. Для автоматизации метода, в частности этапа распознавания наземных контрольных точек на ортофотоплане создан скрипт, использующий нейронную сеть ResNet50 проекта DeepForest. Выявлены значения, характерные для растений борщевика Сосновского:  $G > 0,14$ ;  $MCARI > 0,76$ ;  $BS1 > 0,10$ .

5. Разработан метод экономической оценки использования БАС в сельскохозяйственных процессах, основанный на определении затрат на закупку и эксплуатацию БАС в расчёте на 1 га. Для цифровой системы мониторинга на базе БВС DJI Matrice 200 v2 с камерами DJI Zenmuse X4S и Micasense Altum при высокоточном мониторинге сельскохозяйственных биообъектов площадью 1000 га затраты составят 3739 руб./га. Увеличение площади сельхозугодий приводит к снижению затрат на использование БАС.

#### **Рекомендации научно-исследовательским организациям**

Выявленные закономерности и целостную картину становления и развития систем управления полётом и средств аэрофотосъёмки целесообразно использовать для проектирования интеллектуальных БАС нового поколения, обеспечивающих высокоточный мониторинг и автоматизацию агротехнологических процессов. Рекомендуется применение полученных зависимостей между мультиспектральными данными и состоянием посевов в сочетании с алгоритмами цифрового мониторинга и управления технологическими процессами для разработки новых методик оперативного мониторинга, автоматизированной классификации посевов и формирования управленческих решений.

#### **Рекомендации для сельхозтоваропроизводителей**

Контроль этапов роста и развития сельскохозяйственных культур рекомендуется осуществлять с помощью разработанной системы мониторинга на базе БАС с методом для сбора данных о состоянии сельскохозяйственных биообъектов на производственных и селекционных полях. Для серийных БВС предлагается применять разработанные подвесы для мультиспектральных камер, которые обеспечат сбор качественных данных за один полёт.

Рекомендуется использовать мобильное приложение «Планировщик параметров аэрофотосъёмки с мультиспектральной камерой» для определения параметров полётного задания, программное обеспечение «ВИМ.Анализ растений» для анализа результатов аэрофотосъёмки, «Программа конвертации ГНСС данных в текстовый файл» и «Программное обеспечение для распознавания контрольных точек на ортофотоплане» при фотограмметрической обработке данных, которые способствует сокращению временных затрат и автоматизации оценки состояния сельскохозяйственных культур. При обучении свёрточных нейронных сетей глубокого обучения рекомендуется использовать программы «ITS.ImageCroper», «ITS.ImagePrepare», «Программа подготовки данных для обучения сегментационной нейронной сети», «Программное обеспечение нарезки изображений аэрофотосъёмки для обучения нейронной сети», которые позволят сократить время при подготовке данных для обучения нейронных сетей.

При тематической обработке результатов аэрофотосъёмки предлагается использовать алгоритмы и методы для оценки полевой всхожести посевов сои, оценки сортового разнообразия посевов ярового ячменя, экспресс диагностики состояния

растений картофеля, картирования и оценки состояния растений борщевика Сосновского, позволяющие сократить экономические затраты и снизить загрязнение окружающей среды.

### **Рекомендации для предприятий сельхозмашиностроения**

Предлагается разрабатывать БАС сельскохозяйственного назначения для мониторинга с учетом требований, обоснованных в данной работе к программно-аппаратным частям БАС и результатам выходных материалов. Рекомендуется интегрировать разработанные алгоритмы цифрового мониторинга технологических процессов с методами мультиспектрального анализа для создания единой системы оперативного мониторинга сельскохозяйственных культур, регулярного контроля ключевых агротехнических параметров и автоматизированной оценки состояния посевов на основе спектральных характеристик.

### **Перспективы дальнейшей разработки темы**

Перспективы дальнейшей разработки темы заключаются в исследовании новых методов мониторинга и анализа данных для автоматизации сельскохозяйственных процессов с помощью алгоритмов компьютерного зрения для автономной навигации без GPS/ГЛОНАС и моделей искусственного интеллекта для анализа состояния посевов. Это обеспечит повышение точности и оперативности принятия решений, создание автоматизированных комплексов БАС, что способствует повышению эффективности управления сельскохозяйственными процессами.

### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

*Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ*

1. Артюшин, А.А. Выбор типоразмерного ряда беспилотных летательных аппаратов и полезной нагрузки для мониторинга сельскохозяйственных полей / А.А. Артюшин, Р.К. Курбанов, Л.А. Марченко [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 4(37). – С. 36-43.

2. Смирнов, И.Г. Дифференцированная обработка сельхозугодий с помощью БПЛА / И.Г. Смирнов, Р.К. Курбанов, Л.А. Марченко [и др.] // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 4(37). – С. 30-35.

3. Марченко, Л.А. Беспилотный летательный аппарат на базе гироплана для внесения пестицидов и удобрений / Л.А. Марченко, И.Г. Смирнов, В.В. Краснобородько, А.Ю. Спиридонов, Р.К. Курбанов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 2(35). – С. 45-51.

4. Марченко, Л.А. Технология внесения пестицидов и удобрений беспилотными летательными аппаратами в цифровом сельском хозяйстве / Л.А. Марченко, А.А. Артюшин, И.Г. Смирнов, Т.В. Мочкова, А.Ю. Спиридонов, Р.К. Курбанов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – № 5(15). – С. 38-45.

5. Курбанов, Р.К. Использование теплового канала (LWIR) для оценки состояния посевов и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур / Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова, О.М. Гайдук // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – № 3(40). – С. 87-94.

6. Kurbanov, R.K. Application of vegetation indexes to assess the condition of crops / R.K. Kurbanov, N.I. Zakharova // Agricultural Machinery and Technologies. – 2020. – № 14(4). – pp. 4-11.

7. Личман, Г.И. Концепция точного земледелия на основе понятий идеального поля и цифрового двойника / Г.И. Личман, В.М. Коротченя, И.Г. Смирнов,

Р.К. Курбанов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – Т. 67, № 3(40). – С. 81-86.

8. Смирнов, И.Г. Анализ существующих систем электростатического опрыскивания на БПЛА / И.Г. Смирнов, Р.К. Курбанов, Л.А. Марченко, Д.М. Горшков // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – № 2(39). – С. 67-73.

9. Курбанов, Р.К. Рекомендации по предполетной подготовке БПЛА / Р.К. Курбанов, О. М. Захарова // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2020. – Т. 67, № 1(38). – С. 93-98.

10. Курбанов, Р.К. Мобильный телефон (smartphone) как инструмент агрария в системе цифрового земледелия / Р.К. Курбанов, Г.И. Личман, Н.И. Захарова // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2021. – № 3(44). – С. 129-136.

11. Загоруйко, М.Г. Мониторинг показателей фотосинтетической деятельности и его использование для прогнозирования потенциальной урожайности сои / М.Г. Загоруйко, М.Е. Бельшикина, Р.К. Курбанов [и др.] // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 12. – С. 9-12.

12. Курбанов, Р.К. Повышение точности аэрофотосъемки с применением наземных контрольных точек / Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова, Д.М. Горшков // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2021. – № 15(4). – С. 42-47.

13. Курбанов, Р.К. Обоснование параметров полетного задания беспилотного воздушного судна для мультиспектральной аэрофотосъемки / Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2022. – № 16(3). – С. 33-39.

14. Марченко, Л.А. Себестоимость применения беспилотной авиационной системы для внесения пестицидов и удобрений / Л.А. Марченко, И.В. Смирнов, Р.К. Курбанов [и др.] // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2022. – Т. 16, № 1. – С. 53-62.

15. Дорохов, А.С. Технические средства для химической защиты растений: состояние и перспективы развития / А.С. Дорохов, И.А. Старостин, А.В. Ещин, Р.К. Курбанов // Агроинженерия. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 12-18.

16. Ценч, Ю.С. История развития систем управления беспилотных воздушных судов / Ю.С. Ценч, Р.К. Курбанов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – Т. 17, № 3. – С. 4-15.

17. Курбанов, Р.К. Алгоритм расчета времени полета беспилотного воздушного судна для проведения аэросъемки / Р.К. Курбанов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2023. – Т. 17, № 1. – С. 35-40.

18. Ценч, Ю.С. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения / Ю.С. Ценч, Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2024. – № 18(2). – С. 11-19.

19. Кирюхин, С.В. Применение вегетационных индексов для сравнительной оценки полевой всхожести сои / С.В. Кирюхин, Р.К. Курбанов, С.О. Гуринович [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 2(74). – С. 367-376.

20. Курбанов, Р.К. Основные тенденции в развитии технологии аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий / Р.К. Курбанов, Ю.С. Ценч, Н.И. Захарова // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2025. – Т. 19, № 1(19). – С. 86-95.

21. Курбанов, Р.К. Разработка мобильного приложения для расчета оптимальных параметров полетного задания БВС / Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова,

А.В. Мешков // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2025. – № 1(79). – С. 436-446.

*Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных*

22. Kurbanov, R. Algorithm for recognizing and measuring parameters of biological objects in agriculture based on deep learning convolutional neural networks / R. Kurbanov, N. Bugaev, A. Meshkov [et al.] // E3S Web of Conferences, Rostov-on-Don, 20–23 октября 2020 года. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 10006.

23. Marchenko, L.A. Benefits of using liquid nitrogen fertilizers for Russian Farm Enterprises / L.A. Marchenko, I.G. Smirnov, T.V. Mochkova, R.K. Kurbanov // AMA, Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America. – 2020. – №3(51). – P. 58-62.

24. Kurbanov, R. Development of a gimbal for the Parrot Sequoia multispectral camera for the UAV DJI Phantom 4 Pro / R. Kurbanov, M. Litvinov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Rostov-on-Don, 20–22 октября 2020 года. – Rostov-on-Don, 2020. – P. 012062.

25. Kurbanov, R. Justification and selection of vegetation indices to determine the early soybeans readiness for harvesting / R. Kurbanov, N. Zakharova // E3S Web of Conferences: 14th International scientific and practical conference on state and prospects for the development of agribusiness, INTERAGROMASH 2021. Rostov-on-Don, 24–26 February 2021. Rostov-on-Don: EDP Sciences, 2021. № 273. – 01008.

26. Kurbanov, R. The use of vegetation indices in comparison to traditional methods for assessing overwintering of grain crops in the breeding process / R. Kurbanov, N. Zakharova, V. Sidorenko [et al.] // In proc. Advances in Artificial Systems for Power Engineering II, Москва, 17–19 декабря 2021 года. М.: Springer Nature Switzerland AG, 2022. – № 119. – pp. 52-64.

27. Kurbanov, R.K. Determination of spring barley lodging area with help of unmanned aerial vehicle / R.K. Kurbanov, N.I. Zakharova // Smart innovation, systems and technologies. – 2022. – № 245. – pp. 247-257.

28. Lednev, V.N. Fluorescence mapping of agricultural fields utilizing drone-based LIDAR / V.N. Lednev, M.Ya. Grishin, P.A. Sdvizhensky, R.K. Kurbanov [et al.] // Photonics. – 2022. – Vol. 9, No. 12. – P. 963.

29. Polukhin, A.A. Development of the Parrot Sequoia multispectral camera mount for the DJI Inspire 1 UAV / A.A. Polukhin, S.P. Klimova, M.A. Litvinov, R.K. Kurbanov // Smart Innovation in Agriculture: Part of the Smart Innovation, Systems and Technologies book series. Vol. 264. – Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2022. – P. 217-225.

30. Kurbanov, R.K. Justification of optimal parameters for quadcopter PID-controllers with frame sizes up to 150 mm / R.K. Kurbanov, M.A. Litvinov, S.I. Krivko, [et al.] // E3S Web of Conferences: XI International scientific and practical conference innovative technologies in environmental science and education (ITSE-2023). Divnomorskoe village, Russia, 04–10 сентября 2023 года. Russia: EDP Sciences, 2023. – №. 431. – 06014.

31. Kurbanov, R. Evaluation of field germination of soybean breeding crops using multispectral data from UAV / R. Kurbanov, V. Panarina, A. Polukhin [et al.] // Agronomy. – 2023. – № 13(5). – 1348.

32. Polukhin, A.A. Analysis of soybean varieties maturation using multispectral data / A.A. Polukhin, R.K. Kurbanov, Yu.S. Tsench [et al.] // Improving energy efficiency, environmental safety and sustainable development in agriculture (EESTE-II-2022): Proc. II International scientific and practical conference, Dushanbe, Republic of Tajikistan, 25–28 октября 2022 года. UK: IOP Publishing LTD, 2023. – № 1154. – 12037.

33. Kurbanov, R.K. Pre-flight preparation of an unmanned aerial vehicle DJI Phantom 4 Pro / R.K. Kurbanov, N.I. Zakharova, A.M. Fokin // In: Ronzhin, A., Kostyaev, A. (eds) Agriculture digitalization and organic production. Smart innovation, systems and technologies, 2023. – № 331– pp. 363-374.

34. Lednev, V.N. Drone based fluorescence lidar for agriculture fields in situ diagnostics / V.N. Lednev, M. Ya. Grishin, P. A. Sdvizhensky, V.A. Zavozin, A.F. Bunkin, R.K. Kurbanov [et al.] // Bulletin of the Lebedev Physics Institute. – 2023. – № 3(50). – P. 103-107.

35. Kurbanov, R.K. Monitoring of Heracleum sosnowskyi Manden using UAV Multisensors: case study in Moscow region, Russia / R.K. Kurbanov, A.N. Dalevich, A.S. Dorokhov [et al.] // Agronomy. – 2024. – Vol. 14, № 10. – P. 2451.

*Свидетельства о государственной регистрации интеллектуальной собственности*

36. Патент на изобретение № 2728846 С1 Российская Федерация, МПК В64Д 47/08, G03В 15/00. Подвес для мультиспектральной камеры parrot sequoia для беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 4 Pro: № 2019142321: заявл. 18.12.2019: опубл. 31.07.2020 / И.Г. Смирнов, Р.К. Курбанов, М.А. Литвинов [и др.].

37. Патент на изобретение № 2752037 С1 Российская Федерация, МПК В64Д 47/08. Подвес для мультиспектральной камеры на беспилотный летательный аппарат: № 2021102208: заявл. 01.02.2021: опубл. 22.07.2021 / Р.К. Курбанов, М.А. Литвинов, Я.П. Лобачевский [и др.].

38. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021614841 Российская Федерация. ITS.ImageCroper – Подготовка данных для обучения нейросети: № 2021613986: заявл. 26.03.2021: опубл. 30.03.2021 / Р.К. Курбанов, С.И. Кривко, А.В. Мешков [и др.].

39. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666875 Российская Федерация. Программа подготовки данных для обучения сегментационной нейронной сети: № 2023664885: заявл. 17.07.2023: опубл. 07.08.2023 / Р.К. Курбанов, С.И. Кривко, А.В. Мешков [и др.].

40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666406 Российская Федерация. Программа конвертации ГННС данных в текстовый файл: № 2023664879: заявл. 17.07.2023: опубл. 31.07.2023 / Р.К. Курбанов, С.И. Кривко, А.В. Мешков [и др.].

41. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616648 Российская Федерация. Программное обеспечение для распознавания контрольных точек на ортофотоплане: № 2024615075: заявл. 14.03.2024: опубл. 22.03.2024 / Р.К. Курбанов, А.В. Мешков, С.И. Кривко [и др.].

42. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024682640 Российская Федерация. Программное обеспечение нарезки изображений аэрофотосъемки для обучения нейронной сети: № 2024681456: заявл. 18.09.2024: опубл. 25.09.2024 / Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова, А.В. Мешков [и др.].

43. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024665531 Российская Федерация. Планировщик параметров аэрофотосъемки с мультиспектральной камерой: № 2024664098: заявл. 18.06.2024: опубл. 02.07.2024 / Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова, А.В. Мешков [и др.].

44. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617876 Российская Федерация. Программное обеспечение для оценки полевой всхожести растений сои по данным мультиспектральной аэросъемки с БВС: №

2024615093: заявл. 14.03.2024: опубл. 05.04.2024 / Р.К. Курбанов, С.И. Кривко, А. В. Мешков [и др.].

45. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024617765 Российская Федерация. Программное обеспечение для прогнозирования содержания жира в семенах растений сои по данным мультиспектральной аэросъемки с БВС: № 2024615087: заявл. 14.03.2024: опубл. 04.04.2024 / Р.К. Курбанов, С.И. Кривко, А.В. Мешков [и др.].

46. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024616648 Российская Федерация. Программное обеспечение для распознавания контрольных точек на ортофотоплане: № 2024615075: заявл. 14.03.2024: опубл. 22.03.2024 / Р.К. Курбанов, А.В. Мешков, С.И. Кривко [и др.].

47. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025617460 Российская Федерация. Программное обеспечение модульной архитектуры для анализа состояния растений по данным аэрофотосъёмки: заявл. 07.03.2025: опубл. 26.03.2025 / Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова, А.В. Мешков [и др.].

48. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025616502 Российская Федерация. Программное обеспечение для обнаружения полегания зерновых культур на изображениях с БВС: заявл. 07.03.2025: опубл. 17.03.2025 / Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова, А.В. Мешков [и др.].

*В других изданиях, сборниках научных трудов и материалах конференции*

49. Личман, Г.И. Использование БПЛА для мониторинга состояния селекционных участков / Г.И. Личман, Я.П. Лобачевский, В.П. Елизаров, Р.К. Курбанов // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы IX Международной научно-практической конференции «ИнформАгро-2017», п. Правдинский, Московская область, 07–09 июня 2017 года. – п. Правдинский, Московская обл.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. – С. 311-315.

50. Марченко, Л.А. Основные требования к беспилотным летательным аппаратам для внесения удобрений и пестицидов / Л.А. Марченко, Т.В. Мочкова, Р.К. Курбанов [и др.] // Вестник ВИЭСХ. – 2018. – № 4(33). – С. 107-112.

51. Спиридонов, А.Ю. Обоснование параметров беспилотного летательного аппарата для дифференцированного внесения трихограммы / А.Ю. Спиридонов, Р.К. Курбанов // Вестник ВИЭСХ. – 2018. – № 4(33). – С. 101-106.

52. Марченко, Л.А. Использование оптических систем Green Seeker RT 200 при дифференцированном внесении гербицидов / Л.А. Марченко, Т.В. Мочкова, Р.К. Курбанов // Вестник ВИЭСХ. – 2018. – № 3(32). – С. 50-54.

53. Курбанов, Р.К. Рекомендации для легких беспилотных летательных аппаратов по сбору данных / Р.К. Курбанов, М.Н. Костомахин, Н.И. Захарова [и др.] // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2018. – № 6. – С. 47-53.

54. Костомахин, М.Н. Точное земледелие расширяет свои границы / М.Н. Костомахин, Р.К. Курбанов, Н.Г. Кынев // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2018. – № 3. – С. 7-9.

55. Курбанов, Р.К. Применение геоинформационных решений для обследования селекционных полей / Р.К. Курбанов, Д.М. Горшков, Н.И. Захарова [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – № 3(32). – С. 140-146.

56. Курбанов, Р.К. Оценка перезимовки всходов селекционной озимой пшеницы с помощью БПЛА / Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова, О.М. Захарова [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – № 3(32). – С. 133-139.

57. Курбанов, Р.К. Программное обеспечение для мониторинга и контроля показателей селекционных процессов посевов сои / Р.К. Курбанов, О.М. Захарова, Н.И. Захарова [и др.] // Инновации в сельском хозяйстве. – 2019. – №3(32). – С. 122-132.
58. Личман, Г.И. Интернет вещей в сельском хозяйстве / Г.И. Личман, Р.К. Курбанов, А.И. Беленков // Нивы России. – 2019. – № 5(171). – С. 48-56.
59. Курбанов, Р.К. Использование БПЛА для мониторинга сельскохозяйственных угодий / Р.К. Курбанов // Тезисы 19-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 23–27 ноября 2020 года. – М.: Перо, – 2020. – С. 72-73.
60. Захарова, Н.И. Оценка площади полегания ярового ячменя с помощью мультиспектральной съемки с БПЛА / Н.И. Захарова, Р.К. Курбанов // Тезисы 19-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика», Москва, 23–27 ноября 2020 года. – М.: Перо, – 2020. – С. 55-56.
61. Kurbanov, R. Software for processing multispectral data and field digitization / R. Kurbanov, M. Litvinov, A. Fokin // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2021. – №11. – Р. 39-43.
62. Курбанов, Р.К. Обоснование технологии предполетной подготовки беспилотного воздушного судна для сбора данных о состоянии сельскохозяйственных культур / Р.К. Курбанов, А.М. Фокин // Материалы 8-й Международной научно-практической конференции «Информационные технологии, системы и приборы в АПК. АГРОИНФО-2021», р.п. Краснообск, 21–22 октября 2021 года / под ред. В.В. Альта. – Новосибирск - Краснообск: СФНЦА РАН, 2021. – С. 358-363.
63. Мартынов, М.А. Изучение морфофизиологических показателей детерминантных генотипов сои различных групп спелости в условиях Орловской области / М.А. Мартынов, В.И. Панарина, Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова // Особенности селекции и семеноводства сельскохозяйственных культур в условиях импортозамещения: Сб. Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов, Орел, 25 ноября 2022 года. Орел: ФГБНУ ФНЦ ЗБК, 2022. – С. 88-91.
64. Курбанов, Р.К. Мировой опыт использования беспилотных воздушных судов в сельском хозяйстве / Р.К. Курбанов, Н.И. Захарова // Сельскохозяйственная техника: обслуживание и ремонт. – 2023. – № 8. – С. 54-59.