

На правах рукописи



КУРЧЕНКО Николай Юрьевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ
БЕСПИЛОТНЫХ АВИАЦИОННЫХ СИСТЕМ
В ЦИФРОВОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ АПК**

4.3.2. Электротехнологии, электрооборудование
и энергоснабжение агропромышленного комплекса

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Краснодар, 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина» (ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ)

Научный консультант: **Оськин Сергей Владимирович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Линенко Андрей Владимирович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный аграрный университет» (г. Уфа), энергетический факультет, декан

Башилов Алексей Михайлович
доктор технических наук, профессор (г. Москва)

Курбанов Рашид Курбанович
доктор технических наук, ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (г. Москва), лаборатория информационно-технического обеспечения цифрового земледелия, главный научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева»

Защита диссертации состоится «3» февраля 2027 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 35.2.019.03 при ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ по адресу: 350044, г. Краснодар, ул. Калинина, 13 (корпус факультета энергетики, ауд. 110).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ – <https://kubsau.ru/>.

Автореферат разослан «___» октября 2026 г., размещен на официальном сайте ВАК РФ – <https://vak.gisnauka.ru/> и на сайте ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ – <https://kubsau.ru/>.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук
Самурганов Евгений Ерманекосович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Современный мировой агропромышленный комплекс (АПК) сталкивается с комплексом взаимосвязанных вызовов, угрожающих глобальной продовольственной безопасности. К ним относятся необходимость обеспечения растущего населения доступным продовольствием на фоне истощения земельных и водных ресурсов, распространение резистентных вредителей и болезней сельскохозяйственных культур, усиление негативных климатических последствий, проявляющихся в засухах, наводнениях и других аномалиях, что усложняет планирование и прогнозирование в сельском хозяйстве.

В этих условиях ключевым вектором устойчивого развития АПК становится его глубокая цифровая трансформация. Ее основой является внедрение интеллектуальных технологий, основанных на сборе, анализе больших данных (Big Data) и применении алгоритмов искусственного интеллекта и машинного обучения. Такой подход позволит перейти к ресурсоэффективному сельскому хозяйству, обеспечивающему рост производительности и доходности при минимизации нагрузки на окружающую среду.

Одним из наиболее динамичных и перспективных элементов технологического перевооружения АПК являются беспилотные авиационные системы (БАС). В последние годы они превратились из инструмента наблюдения в многофункциональную платформу для решения критически важных агрономических задач на всех этапах производственного цикла: мониторинга, диагностики и внесения.

Однако широкомасштабное внедрение БАС-технологий в практику отечественного АПК сдерживается рядом научно-технических и организационных проблем. К ним относятся необходимость разработки адаптированных алгоритмов анализа данных для конкретных культур и регионов, сложность интеграции разрозненных потоков информации (данные БАС, спутников, датчиков) в единые отраслевые цифровые платформы, дефицит квалифицированных междисциплинарных кадров, способных работать на стыке агрономии, инженерии и IT.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена острой потребностью в разработке научно-методических основ и практических решений для эффективного применения БАС

в растениеводстве, в соответствии со стратегическим задачам импортозамещения, цифровизации и обеспечения технологического суверенитета отечественного агропромышленного комплекса.

Работа выполнена в соответствии НИР Кубанского ГАУ на 2021–2025 гг. по теме № 32 (номер госрегистрации 121031700099-1), государственных заданий МСХ РФ на 2019–2022 гг. по темам: «Прогнозирование и мониторинг научно-технологического развития АПК: технологии точного сельского хозяйства, включая автоматизацию и роботизацию», «Продукционный анализ научно-технологического развития агропромышленного комплекса в области технологии точного сельского хозяйства, автоматизации и роботизации» (номер госрегистрации АААА-А20-120012190090-9, АААА-А20-120012890063-6, 122032300494-4, 122031400635-3), гранта Кубанского научного фонда МФИ-П-20.1-45/20 «Исследование методов моделирования основных физических процессов в сложных электроэнергетических конструкциях», гранта Президента Российской Федерации по теме «Адаптация технологии беспилотных летательных аппаратов для сельского хозяйства», федерального проекта «Кадры для беспилотных авиационных систем» национального проекта «Беспилотные авиационные системы», образовательной программы АНО «Университет национальной технологической инициативы 2035» и программы «Приоритет 2030» ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ.

Степень разработанности темы. Первые исследования по технологиям мониторинга в сельском хозяйстве проводились такими учеными, как Левенгаупт А.И., Селяков Л.Я., Сметанин И.С. С 90-х годов XX века проводятся исследования по реализации новой концепции сельского хозяйства – цифрового земледелия. Инструментами для реализации выступают технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) на основе спутниковых данных, дифференцированного внесения, параллельного вождения, центральным звеном становятся беспилотные технологии, в частности БАС для мониторинга и внесения средств защиты растений (СЗР) и удобрений. Значимый вклад в изучение элементов цифрового земледелия внесли Жалнин Э.В., Личман Г.И., Труфляк Е.В. Активно технологию ДЗЗ исследовали с начала 2000-х годов в Агрофизическом НИИ под руководством Якушева В.В. Актуальные исследования по

применению БАС, как инструмента цифрового земледелия проводят Ценч Ю.С., Курбанов Р.К., Башилов А.М., Мифтахов И.Р., Мударисов С.Г., Мартинез Л., Воронков И.В. Тымчук А.И. Оценкой эффективности работы БАС по внесению пестицидов и агрохимикатов занимается Асовский В.П. и Кузьменко А.С. (НПК «ПАНХ»), вопросами лазерного сканирования рельефа Погорелов В.П. (ФГБОУ ВО Кубанский ГУ). Активно исследует тему применения беспилотных аппаратов с усовершенствованной системой электростатического опрыскивания Линенко А.В. (ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ). По направлению применения БАС в сельском хозяйстве проводятся исследования группами ученых из ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, РГАУ-МСХА, ФГБОУ ВО Рязанский ГАУ, ФГБОУ ВО Новосибирский ГАУ, ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ, ФГБНУ ФНЦ РИСА, ФГБНУ ВИЗР и ФГБНУ ФНЦ БЗР. Совершенствуется нормативно-правовая база в области БАС, рынок пополняется новыми моделями различной конфигурации и рабочими органами, появляются современные программные комплексы, но несмотря на растущий интерес к технологии со стороны реального сектора, администрации и научного сообщества известные исследования носят разрозненный характер, с упором на отдельные технологические операции. Отсутствие исследований, описывающих связи между эксплуатационными показателями БАС и параметрами технологического процесса с качеством выполнения агрооперации не позволяет осуществлять системное проектирование, оптимизацию и широкую интеграцию БАС в энергетические и технологические границы агропредприятия.

Научная проблема состоит в следующем: на предприятиях агропромышленного комплекса возникает потребность в научно-обоснованных методах и средствах применения беспилотных авиационных систем, их отсутствие сдерживает широкое внедрение БАС в технологические процессы АПК и не позволяет строить современные экономические и энергетические модели предприятия и добиваться высоких производственных показателей.

Научная гипотеза – создание научно-методологической базы применения БАС в технологиях сельского хозяйства приведет к их широкому внедрению в АПК, снижению эксплуатационных затрат при проведении основных технологических операций в цифровом земледелии и к повышению экологичности агробиоценоза.

Объектом исследования являются технологии БАС в цифровом земледелии, электротехнологические способы и средства, применяемые в БАС.

Предметом исследования являются методы и методики эксплуатации БАС, включающие математические модели агротехнологический условий в цифровом земледелии.

Цель исследования: обоснование научно-методологической базы применения беспилотных авиационных систем в цифровом земледелии с разработкой методов и электротехнологических средств повышения эффективности их эксплуатации, для широкого внедрения БАС в инновационные технологии АПК.

Задачи исследования:

1. Разработать комплексную систему критериев оценки эффективности эксплуатации БАС.

2. Обосновать методологию повышения эксплуатационной эффективности БАС.

3. Разработать математические компьютерные модели деятельного и приземного слоев атмосферы, включающие анализ гидродинамических, аэродинамических и электротехнологических процессов, возникающих при выращивании сельскохозяйственной продукции с применением БАС.

4. В COMSOL Multiphysics разработать компьютерные модели распределения воздушных потоков при работе БПЛА: возникающих вблизи лесополос при различных скоростях набегающего потока; создаваемых вращающимися лопастями.

5. Разработать математические модели мониторинга сельскохозяйственных объектов для составления полетного задания в зависимости от данных аэрофотосъемки, потока ветра, агротехнологических характеристик и технических характеристик БАС.

6. Разработать имитационную компьютерную модель автономного источника энергоснабжения БАС для определения: режима работы генератора электроэнергии, установленной мощности и необходимого количества топлива приводного двигателя.

7. На основе методологии разработать укрупненную последовательность определения эксплуатационной эффективности БАС в операциях цифрового земледелия и получить интервалы значений показателей экономической и энергетической эффективности БАС.

8. Разработать способы и электротехнологические средства повышения эффективности БАС в цифровом земледелии и в учебных курсах при подготовке операторов БПЛА в соответствии с национальными проектами.

9. Провести полевые экспериментальные исследования при выполнении основных технологических операций, подтверждающих эффективность БАС в инновационной технологии растениеводства конкретных предприятий.

10. Провести технико-экономическую оценку результатов внедрения БАС в структуру цифрового земледелия.

Научная новизна работы:

- предложена комплексная система экономического и энергетического критериев оценки эффективности эксплуатации БАС, позволяющая связать между собой: параметры БАС, тип и качество технологической операции, экономические, инфраструктурные и энергетические показатели, экологический эффект;

- обоснована методология повышения эксплуатационной эффективности БАС и потребность перехода от эмпирического анализа к научно-обоснованному управлению в рамках системы «атмосфера–БАС–растительность», базирующаяся на комплексной системе оценочных критериев, системном анализе и математическом моделировании;

- впервые разработаны математические компьютерные модели деятельного и приземного слоев атмосферы, включающие анализ гидродинамических, аэродинамических и электротехнологических процессов, возникающих при выращивании сельскохозяйственной продукции с применением БАС;

- в COMSOL Multiphysics разработаны компьютерные модели распределения воздушных потоков при работе БПЛА: возникающих вблизи лесополос при различных скоростях набегающего потока; создаваемых вращающимися лопастями;

- разработана имитационная компьютерная модель автономного источника энергоснабжения БАС для определения: режима работы генератора электроэнергии, установленной мощности и необходимого количества топлива приводного двигателя;

- разработана укрупненная последовательность определения эксплуатационной эффективности БАС в операциях цифрового

земледелия и получены интервалы значений показателей экономической и энергетической эффективности БАС;

– разработаны способы и электротехнологические средства повышения эффективности БАС в цифровом земледелии и в учебных курсах при подготовке операторов БПЛА в соответствии с национальными проектами.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– комплексная система критериев эффективности эксплуатации БАС в цифровом земледелии позволяет обосновать научно-методологическую базу для широкого применения БАС в АПК;

– методология повышения эксплуатационной эффективности БАС, позволяет сформулировать и обосновать научно-методологические принципы интеграции БАС в существующие и перспективные технологические процессы цифрового земледелия;

– математические модели деятельного и приземного слоев с учетом гидродинамических, аэродинамических и электротехнологических процессов вносят вклад в теорию взаимодействия беспилотных летательных аппаратов с биологическими объектами и окружающей средой, а также приведут к оптимизации параметров полетных заданий БАС, что сократит экономические и энергетические затраты предприятия при получении сельскохозяйственной продукции;

– обоснованные зависимости значений параметров полетного задания от данных аэрофотосъемки, потока ветра, агротехнологических условий и характеристик БАС необходимы для дополнения алгоритмов конкретных полетных заданий;

– предлагаемые электротехнологические приемы в комплексе с БАС повысят плотность осаждения капель рабочей жидкости, снизят ее потери и приведут к более эффективному действию пестицидов;

– новые способы и средства повышения эффективности функционирования БАС в цифровом земледелии позволяющие сократить расход энергетических ресурсов, удобрений и средств защиты растений, а также уменьшить трудозатраты при проведении основных технологических операций в растениеводстве;

– методология повышения эксплуатационной эффективности БАС может быть масштабирована и адаптирована для различных типов предприятий АПК - от малых фермерских хозяйств до крупных агрохолдингов;

– полевые экспериментальные исследования при выполнении основных технологических операций, подтверждают эффективность БАС в инновационной технологии растениеводства конкретных предприятий.

Методология и методы исследования. Теоретико-методологическими основами диссертационной работы являются системный подход, методы системного и регрессионного анализов, моделирования, научного планирования эксперимента. В теоретических исследованиях использовались законы аэродинамики, гидродинамики, теплотехники и электротехники. Производственные исследования проводились с использованием стандартных методик, сертифицированных приборов и современного оборудования. В экспериментальных исследованиях применялись совмещенные методы теории планирования эксперимента, методы учета биологической эффективности, основанные на биологических показателях.

Положения, выносимые на защиту:

- комплексная система критериев эффективности эксплуатации БАС в цифровом земледелии;
- методология повышения эксплуатационной эффективности БАС;
- математические компьютерные модели деятельного и приземного слоев атмосферы, включающие анализ гидродинамических, аэродинамических и электротехнологических процессов, возникающих при выращивании сельскохозяйственной продукции с применением БАС;
- компьютерные модели распределения воздушных потоков при работе БПЛА: возникающих вблизи лесополос при различных скоростях набегающего потока; создаваемых вращающимися лопастями;
- математические модели мониторинга сельскохозяйственных объектов для составления полетного задания в зависимости от данных аэрофотосъемки, потока ветра, агротехнологических характеристик и технических характеристик БАС;
- компьютерная модель автономного источника энергоснабжения БАС для определения: режима работы генератора электроэнергии, установленной мощности и необходимого количества топлива приводного двигателя;
- укрупненная последовательность определения эксплуатационной эффективности БАС в операциях цифрового земледелия

и полученные интервалы значений показателей экономической и энергетической эффективности БАС;

– новые способы и средства повышения эффективности функционирования БАС в цифровом земледелии;

– результаты полевых экспериментальных исследований при выполнении основных технологических операций;

– технико-экономическая оценка результатов внедрения БАС в структуру цифрового земледелия.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Результаты работы, их достоверность, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертационном исследовании, подтверждаются сходимостью теоретических положений с результатами экспериментов с использованием апробированных общепринятых методик, высокой точностью имитационного моделирования, широкой апробацией в хозяйствах Краснодарского края и научными положениями, обоснованными ведущими учеными по фундаментальным и прикладным аспектам БАС в растениеводстве.

Основные положения диссертационной работы доложены и одобрены на международных и всероссийских конференциях: «Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве» (г. Санкт-Петербург, 2018 г.), «Информационные технологии в агропромышленном комплексе России» (г. Москва, 2019 г.), «Научные приоритеты адаптивной интенсификации сельскохозяйственного производства» (г. Краснодар, 2019 г.), «Перспективы развития аграрных наук» (г. Чебоксары, 2020 г.), «Роль современных технологий и средств мониторинга в АПК» (г. Рурки, 2020 г.) «Приоритетные направления научно-технологического развития агропромышленного комплекса» (г. Новосибирск, 2020 г.), «Применение беспилотных аппаратов в нефтегазовом секторе и сельском хозяйстве» (г. Екатеринбург, 2021 г.), «Современные проблемы и направления развития конструкций, технического сервиса и эксплуатации наземных транспортных и транспортно-технологических средств и комплексов» (г. Зерноград, 2023 г.), Ежегодной научно-практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2024 год (г. Краснодар, 2025 г.), «Экономические проблемы, направления и механизмы обеспечения технологического лидерства в ЕАЭС в аграрной сфере (г. Краснодар, 2025 г.),

«Энергосистемы будущего» (г. Москва, 2025 г.), «Инновации в промышленности и АПК» (г. Майкоп, 2026 г.), «Актуальные вопросы развития авиационной науки и техники» (г. Краснодар 2026 г.), «Цифровая революция: беспилотные системы и искусственный интеллект» (г. Майкоп, 2026 г.).

Материалы диссертационного исследования вошли в конкурсные проекты и отмечены дипломами и серебряной медалью на международном салоне изобретений и новых технологий «Новое время» (2020 г.), золотой медалью на салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед» (2021 г.), серебряной медалью на выставке «Агрорусь» (2021 г.), бронзовой медалью на выставке «Золотая осень» (2021 г.), а также дипломом лауреата премии Администрации Краснодарского края в области науки и инноваций (2022 г.).

Реализация результатов исследования. Результаты исследований одобрены: экспертной научно-технической секцией «Механизация» НТС министерства сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Краснодарского края (2022 г.), Министерством топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства Краснодарского края (2022 г.); внедрены в производственный процесс УОХ «Краснодарское», УОХ «Кубань», АО фирмы «Агрокомплекс» им. Н.И. Ткачева, опытно-семеноводческого хозяйства (ОСХ) «Березанское», Федерального научного центра биологической защиты растений (ФГБНУ ФНЦБЗР), ООО «АСТ», ООО «Спец», ООО «ПСК Пластметалл», ООО «Агродом».

Материалы научно-исследовательской работы используются в учебном процессе при изучении дисциплин «Электротехнологии в АПК», «Электротехнологии в сельском хозяйстве», «Цифровые технологии в АПК», «БПЛА в землеустройстве и кадастре», «БПЛА в строительстве» на кафедре физики Кубанского ГАУ при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Агроинженерия», «Природообустройство и водопользование», «Землеустройство и кадастры», «Строительство». Результаты научных исследований были внедрены в учебный процесс при реализации программ дополнительного профессионального образования: «Оператор дронов гражданского назначения», «Основы эксплуатации беспилотных

летательных аппаратов», а также программы профессионального обучения «Внешний пилот беспилотных воздушных судов (с максимальной взлетной массой 30 кг и менее)». Образовательные программы реализовывались как на базе Кубанского ГАУ, так и в рамках договоров о сетевом взаимодействии с ООО «Школа беспилотной авиации» (г. Калининград) и ООО «Нетология» (г. Москва). Материалы исследования использовались при подготовке учебных материалов и видео-контента в рамках проекта «Цифровая кафедра» (Кубанский ГАУ), образовательных программах АНО «Университет национальной технологической инициативы 2035» в рамках Федерального проекта «Кадры для беспилотных авиационных систем», в инженерном университете UETR (г. Рурки, Республика Индия), а также в процессе подготовки учителей агротехнологических классов, что способствует распространению компетенций в области цифрового земледелия среди педагогического сообщества.

Публикации. Основное содержание работы отражено в 51 научной работе, в том числе: 17 статьях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК России, 3 публикациях в наукометрической базе Scopus и WoS, 9 свидетельствах о государственной регистрации интеллектуальной собственности и 22 статьях – в прочих изданиях.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 408 страницах, состоит из введения, основной части, содержащей 135 рисунков и 85 таблиц, заключения, списка литературы (включает 228 наименований, в том числе 20 – на иностранном языке), 56 листов приложений.

Во введении изложены актуальность исследований, цель работы, задачи исследования, научная новизна, практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен анализ состояния цифрового земледелия в АПК РФ, рассмотрены этапы цифровой трансформации сельского хозяйства и структурно-функциональная модель системы цифрового земледелия. Согласно проведенному анализу одним из передовых направлений в развитии цифрового земледелия станет применение БАС. Рассмотрены существующие классификации БАС. Детально проанализированы направления применения БАС в растениеводстве. Анализ выявил разнообразие применяемой полезной нагрузки, но широта возможностей не подкреплена

унифицированными методиками выбора оборудования и режимов работы, что снижает эффективность внедрения и общий коэффициент загрузки парка БАС. Анализ применяемого программного обеспечения (ПО) показывает, что оно носит закрытый характер, не учитывает все требования АПК. Отсутствуют универсальные решения, интегрирующие планирование полета, обработку данных и формирование карт-заданий с учетом агрономических требований. Выполнен анализ существующих подходов к оценке эффективности эксплуатации БАС.

Сформулирована цель работы и задачи исследования.

Во второй главе обосновывается методология повышения эксплуатационной эффективности БАС, основанная на двухкомпонентной системе оценки, включающей экономический и энергетический критерии с математическими, компьютерными и имитационными моделями.

Общий критерий экономической эффективности носит характер сводного оценочного индекса, его предлагается рассчитывать как сумму отдельных безразмерных коэффициентов экономической эффективности:

$$K_{экэ} = K_{рент} + K_{уст} + K_{вод\text{ рес}} + K_{зам} + K_{пром} + K_{пров} + K_{экол}, \quad (1)$$

где $K_{рент}$ – коэффициент рентабельности инвестиций; $K_{уст}$ – коэффициент устойчивости при погашении долга; $K_{вод\text{ рес}}$ – коэффициент экономии водного ресурса; $K_{зам}$ – коэффициент замещения топлива; $K_{пром}$ – коэффициент производительности работ по мониторингу; $K_{пров}$ – коэффициент производительности работ по внесению СЗР, удобрений и семян; $K_{экол}$ – коэффициент экологической эффективности.

Отдельные коэффициенты рассчитывались следующим образом. Коэффициент рентабельности инвестиций $K_{рент}$ равен:

$$K_{рент} = \frac{NPV}{I_0} = \frac{-I_0 + \sum_{t=0}^T \frac{D_t}{(1+r)^t}}{I_0}, \quad (2)$$

где NPV – чистая приведенная стоимость, руб.; I_0 – объем капитальных инвестиций, руб.; D_t – доходы, руб.; r – величина банковской ставки, о.е.; t – срок кредита, годы.

С учетом объема необходимых инвестиций капитальные инвестиции I_0 (включая капитальные вложения) при внедрении БАС могут быть найдены:

$$I_0 = I_{\text{БАС}} + I_{\text{оборуд}} + I_{\text{обуч}} + I_{\text{ПО}} + I_{\text{инфра}}, \quad (3)$$

где $I_{\text{БАС}}$ – стоимость БАС, руб.; $I_{\text{оборуд}}$ – стоимость навесного оборудования, руб.; $I_{\text{обуч}}$ – стоимость обучения персонала, руб.; $I_{\text{ПО}}$ – стоимость ПО, руб.; $I_{\text{инфра}}$ – стоимость инфраструктуры, руб.

Доходы можно определять по выражению:

$$D_i = \Delta C_{\varphi is} + \Pi_{\text{пр}\varphi is} - Y_{\text{пр}\varphi is}, \quad (4)$$

где $\Delta C_{\varphi is}$ – доход от снижения эксплуатационных затрат, руб.; $\Pi_{\text{пр}\varphi is}$ – доход от снижения потерь продукции, руб.; $Y_{\text{пр}\varphi is}$ – убыток от недоиспользования потенциала агрегата, руб.

Для случая внедрения БАС и замены традиционной технологии возделывания растениеводческой продукции новой, получаем выражение доходов с применением БАС:

$$D_i \text{ БАС} = C_{\text{эксп,трад}} - C_{\text{эксп,БАС}} + \Pi_{\text{пр,БАС}} - Y_{\text{пр,БАС}} + B_{\text{кач эффект}} + B_{\text{эк}}, \quad (5)$$

где $C_{\text{эксп,трад}}$ и $C_{\text{эксп,БАС}}$ – эксплуатационные затраты традиционной технологии и при применении БАС, руб.; $\Pi_{\text{пр,БАС}}$ – дополнительный доход от снижения потерь продукции, руб.; $Y_{\text{пр,БАС}}$ – убыток от недоиспользования, руб.; $B_{\text{эффект}}$ – эффект экономии водного ресурса, руб.; $B_{\text{эк}}$ – экологический эффект, руб.

При традиционном подходе эксплуатационные затраты можно рассчитать по формуле:

$$C_{\text{эксп,трад}} = Z_{\text{О.Т.тр}} + Z_{\text{ТСМтр}} + Z_{\text{Ртр}} + A_{\text{тр}} + И_{\text{В.Мтр}}, \quad (6)$$

где $Z_{\text{О.Т.тр}}$ – затраты денежных средств на оплату труда персонала, руб.; $Z_{\text{ТСМтр}}$ – затраты денежных средств на оплату ГСМ, руб.; $Z_{\text{Ртр}}$ – затраты денежных средств на ремонт и ТО, руб.; $A_{\text{тр}}$ – амортизационные отчисления, руб.; $И_{\text{В.Мтр}}$ – издержки денежных средств, руб.

При применении БАС эксплуатационные затраты можно рассчитать по формуле:

$$C_{\text{эксп,БАС}} = \alpha_{\tau} \cdot k_{\text{риск}} \cdot (Z_{\text{ОП}} + Z_{\text{эл/зар}} + Z_{\text{рем}} + A_{\text{БАС}} + Z_{\text{мат}}), \quad (7)$$

где α_{τ} – коэффициент учет поэтапности внедрения, о.е.; $k_{\text{риск}}$ – коэффициент влияния возможных рисков; $Z_{\text{ОП}}$ – оплата труда персонала, руб.; $Z_{\text{эл/зар}}$ – затраты на электроэнергию АКБ, руб.; $Z_{\text{рем}}$ – затраты на ремонт и ТО, руб.; $A_{\text{БАС}}$ – амортизация БАС, руб.; $Z_{\text{мат}}$ – расходные материалы, руб.

Оплата труда персонала $Z_{\text{ОП}}$ с учетом перераспределения обязанностей в существующем коллективе, энергозатраты $Z_{\text{эл/зар}}$ и затраты на ремонт $Z_{\text{рем}}$ рассчитываются по выражениям:

$$З_{\text{оп}} = N_{\text{оп}} \cdot S_{\text{оп}} + N_{\text{д}} \cdot S_{\text{д}}, \quad З_{\text{эл/зар}} = E_{\text{БАС}} \cdot P_{\text{эл эн}}, \quad З_{\text{рем}} = C_{\text{АКБ}} + C_{\text{ремонт}} + C_{\text{обн ПО}}, \quad (8)$$

где $N_{\text{оп}}$ – количество операторов БАС, чел.; $S_{\text{оп}}$ – зарплата оператора, руб./чел.; $N_{\text{д}}$ – количество аналитиков чел; $S_{\text{д}}$ – зарплата аналитика руб./чел.; $E_{\text{БАС}}$ – потребление электроэнергии БАС на заряд АКБ, кВт·ч; $P_{\text{эл эн}}$ – тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч; $C_{\text{АКБ}}$ – стоимость замены аккумуляторов руб./год; $C_{\text{ремонт}}$ – стоимость ремонта руб./год; $C_{\text{обн ПО}}$ – стоимость обновления ПО, руб./год, $C_{\text{проч}}$ – прочие затраты, руб./год.

Дополнительный доход от снижения потерь продукции при использовании БАС $\Pi_{\text{пр,БАС}}$ может быть получен, если БАС позволяет вовремя выявить болезни растений, вредителей, недостаток влаги и снизить потери урожая, тогда:

$$\Pi_{\text{пр,БАС}} = \Delta Y_{\text{сохр}} = S_{\text{обр}} \cdot Y \cdot C_{\text{зерна}} \cdot K_y, \quad (9)$$

где $\Delta Y_{\text{сохр}}$ – стоимость дополнительного урожая при применении БАС, руб.; $S_{\text{обр}}$ – площадь обработки, га; Y – урожайность, ц/га; $C_{\text{зерна}}$ – цена на зерно руб./кг; K_y – прирост урожая, о.е.

Убыток от недоиспользования потенциала БАС можно определить следующим образом:

$$Y_{\text{пр,БАС}} = \sum_i^T B_j \cdot d \cdot \delta, \quad \delta = \frac{T_{\text{ф}}}{T_{\text{max}}}, \quad (10)$$

где B_j – балансовая стоимость БАС, руб.; d – ставка депозита, о.е.; δ – коэффициент загрузки БАС; $T_{\text{ф}}$ – фактическое время работы БАС, ч; T_{max} – максимальный фонд рабочего времени.

Максимальный фонд рабочего времени рассчитывается с учетом технических, климатических и регламентных ограничений:

$$T_{\text{max}} = T_{\text{календ}} - T_{\text{регламент}} - T_{\text{метео}} - T_{\text{простой}}, \quad (11)$$

где $T_{\text{календ}}$ – общее количество часов; $T_{\text{регламент}}$ – время, необходимое на ТО, ч; $T_{\text{метео}}$ – время, в течение которого полеты невозможны из-за погодных условий, ч; $T_{\text{простой}}$ – время простоя, ч.

Для крупного хозяйства с парком техники БАС коэффициент загрузки может достигать 0,80–0,85. Рекомендуется поддерживать коэффициент загрузки $\delta = 0,60–0,65$; из-за недоиспользования БАС, коэффициент загрузки может составить 0,18.

Эффект экономии водного ресурса от точечного внесения СЗР и удобрений рассчитывается по выражению:

$$B_{\text{эффект}} = S_{\text{обр}} \cdot (N_{\text{трак}} - N_{\text{факт}}) \cdot C_{\text{воды}}, \quad (12)$$

где $N_{\text{трак}}$ – норма внесения традиционным способом, л/га; $N_{\text{факт}}$ – фактическая норма внесения БАС, л/га; $C_{\text{воды}}$ – цена водного ресурса, руб./л.

Экологический эффект $B_{\text{эк}}$ может быть выражен:

$$B_{\text{эк}} = (Q_{\text{топлтрад}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}} - Q_{\text{топлБАС}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}}) \cdot P_{\text{CO}_2}, \quad (13)$$

где $Q_{\text{топлтрад}}$ – расход ГСМ трактора, кг; $\varepsilon_{\text{топл}}$ – коэффициент выбросов CO_2 от ГСМ, т $\text{CO}_2/\text{л}$; $Q_{\text{топлБАС}}$ – расход ГСМ при использовании БАС, кг; P_{CO_2} – цена углеродных квот, руб./кг CO_2 .

Коэффициент устойчивости при погашении долга $K_{\text{уст}}$ можно рассчитать по формуле:

$$K_{\text{уст}} = \frac{DSCR}{DSCR_{\text{max}}}, \quad DSCR = \frac{D_i - I_0}{P_t} \quad (14)$$

где $DSCR$ – коэффициент покрытия долга, о.е.; $DSCR_{\text{max}}$ – порог устойчивости предприятия для покрытия долга, о.е.; P_t – ежегодный платеж по кредиту, руб.

Коэффициент экономии водного ресурса $K_{\text{вод рес}}$ и коэффициент замещения топлива $K_{\text{зам}}$ находятся по выражению:

$$K_{\text{вод рес}} = \frac{S_{\text{обр}} \cdot (N_{\text{трак}} - N_{\text{факт}}) \cdot \text{Ц}_{\text{воды}}}{S_{\text{обр}} \cdot N_{\text{трак}} \cdot \text{Ц}_{\text{воды}}}, \quad K_{\text{зам}} = \frac{(Q_{\text{топл}} \cdot P_{\text{топл}}) - (E_{\text{БАС}} \cdot P_{\text{эл эн}})}{Q_{\text{топл}} \cdot P_{\text{топл}}} \quad (15)$$

где $Q_{\text{топл}}$ – расход ГСМ, кг; $P_{\text{топл}}$ – цена ГСМ, руб./л.

Коэффициенты производительности работ по мониторингу, внесению СЗР и коэффициент экологической эффективности $K_{\text{экол}}$ рассчитываются:

$$K_{\text{пром}} = \frac{S_{\text{БАСМ}}/t_{\text{БАСМ}}}{S_{\text{традМ}}/t_{\text{традМ}}}, \quad K_{\text{пров}} = \frac{S_{\text{БАСВ}}/t_{\text{БАСВ}}}{S_{\text{традВ}}/t_{\text{традВ}}}, \quad K_{\text{экол}} = \frac{Q_{\text{топлтрад}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}} - Q_{\text{топлБАС}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}}}{Q_{\text{топлтрад}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}}} \quad (16)$$

где $S_{\text{БАСМ}}, S_{\text{традМ}}$ – площадь мониторинга с БАС и традиционным способом, га; $t_{\text{БАСМ}}, t_{\text{традМ}}$ – время выполнения операции, ч; $S_{\text{БАСВ}}, S_{\text{традВ}}$ – площадь внесения СЗР или удобрений с БАС и трактором, га/день; $t_{\text{БАСВ}}, t_{\text{традВ}}$ – время выполнения операции с БАС и трактором, ч.

Общая формула для определения критерия экономической эффективности $K_{\text{экэ}}$ принимает вид:

$$\begin{aligned} K_{\text{экэ}} = & \frac{-I_0 + \sum_{t=0}^T \frac{D_i}{(1+r)^t}}{I_0} + \frac{DSCR}{DSCR_{\text{max}}} + \\ & + \frac{S_{\text{обр}} \cdot (N_{\text{трак}} - N_{\text{БАС}}) \cdot \text{Ц}_{\text{воды}}}{S_{\text{обр}} \cdot N_{\text{трак}} \cdot \text{Ц}_{\text{воды}}} + \frac{(Q_{\text{топл}} \cdot P_{\text{топл}}) - (E_{\text{БАС}} \cdot P_{\text{эл эн}})}{Q_{\text{топл}} \cdot P_{\text{топл}}} + \\ & + \frac{S_{\text{БАСМ}}/t_{\text{БАСМ}}}{S_{\text{традМ}}/t_{\text{традМ}}} + \frac{S_{\text{БАСВ}}/t_{\text{БАСВ}}}{S_{\text{традВ}}/t_{\text{традВ}}} + \frac{Q_{\text{топлтрад}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}} - Q_{\text{топлБАС}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}}}{Q_{\text{топлтрад}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}}} \end{aligned} \quad (17)$$

Применение $K_{\text{экэ}}$ в сельскохозяйственных предприятиях позволяет перевести выбор технологии из области интуитивных решений

в плоскость доказательного проектирования, обосновать инвестиционные заявки перед кредитными организациями и инвесторами, оптимизировать структуру парка БАС с учетом специфики конкретного хозяйства и возделываемых культур.

Для понимания места включения БАС в технологическую цепочку и эффективность этого включения следует применить и энергетический подход. Сущность энергетического подхода заключается в оценке энергоэффективности использования БАС при замене традиционной технологии и сравнении отдельных БАС. Предлагается производить такую оценку в абсолютных и относительных показателях. В качестве абсолютного показателя энергоэффективности можно использовать удельные энергетические затраты $E_{уд}$, а качестве относительного показателя введем коэффициент энергетической эффективности $K_{энэ баз}$:

$$E_{уд} = \frac{P_{пот}}{W}, \quad K_{энэ баз} = \frac{\Delta E}{E_{баз}} = \frac{E_{баз} - E_{факт}}{E_{баз}} \quad (18)$$

где $P_{пот}$ – потребляемая мощность, кВт; W – производительность агрегата, га/ч; $E_{баз}$ – совокупные удельные энергетические затраты базовой технологии, МДж/га; $E_{факт}$ – фактические совокупные удельные энергетические затраты, МДж/га.

В случае использования традиционной технологии, при замене традиционной технологии на БАС и при замене традиционной машины на БАС коэффициенты энергетической эффективности могут быть рассчитаны:

$$K_{энэ ТР} = \frac{E_{баз ТР} - E_{факт ТР}}{E_{баз ТР}}, \quad K_{энэ БАС} = \frac{E_{баз ТР} - E_{сов БАС}}{E_{баз ТР}}, \quad K_{энэ БПЛА} = \frac{E_{ТР} - E_{уд БПЛА}}{E_{ТР}}, \quad (19)$$

где $E_{баз ТР}$ – удельные энергетические затраты базовой традиционной технологии, МДж/га; $E_{факт ТР}$ – фактические удельные совокупные энергетические затраты традиционной технологии, МДж/га; $E_{сов БАС}$ – фактические совокупные удельные энергетические затраты БАС, МДж/га; $E_{ТР}$ – удельное фактическое энергопотребление применяемой машины, МДж/га; $E_{уд БПЛА}$ – удельное энергопотребление применяемого БПЛА, МДж/га.

Сравнить конкретную машину традиционной технологии для выполнения операции, непосредственно с заменяемым БПЛА и при сравнении двух БПЛА, существующего и нового, можно по формулам:

$$K_{\text{Энэ}} = \frac{E_{\text{ТР}}}{E_{\text{уд БПЛА}}}, \quad K_{\text{Энэ нов БПЛА}} = \frac{E_{\text{уд БПЛА}} - E_{\text{уд нов БПЛА}}}{E_{\text{уд БПЛА}}}, \quad (20)$$

где $E_{\text{уд БАС}}$ – удельные энергетические затраты существующей БАС, МДж/га; $E_{\text{уд нов БАС}}$ – удельные энергетические затраты новой технологии БАС, МДж/га.

При замене традиционной технологии на БАС, в общем случае совокупные энергетические затраты технологии с БАС $E_{\text{сов БАС}}$ рассчитываются по формуле:

$$E_{\text{сов БАС}} = E_{\text{уд БАС}} + E_{\text{косв}}, \quad E_{\text{уд БАС}} = E_{\text{уд БПЛА}} + E_{\text{зу}} + E_{\text{см у}} + E_{\text{перс}} \quad (21)$$

где $E_{\text{косв}}$ – косвенные энергетические затраты БАС, МДж/га; $E_{\text{зу}}$ – удельные энергетические затраты зарядных устройств МДж/га; $E_{\text{см у}}$ – удельные энергетические затраты смесительного узла, МДж/га; $E_{\text{перс}}$ – энергетические затраты персонала, МДж/га.

Удельные энергетические затраты зарядных устройств, смесительного узла и персонала определяются по формулам:

$$E_{\text{зу}} = \frac{E_{\text{удБПЛА}}}{\eta_{\text{Г}} \cdot \eta_{\text{сзу}}}, \quad E_{\text{см у}} = \frac{e_{\text{Г}} \cdot Q_{\text{ТГСУ}}}{\eta_{\text{Г}}}, \quad E_{\text{перс}} = e_{\text{оп}} \cdot n_{\text{оп}} + e_{\text{вр}} \cdot n_{\text{вр}} + e_{\text{а}} \cdot n_{\text{а}}, \quad (22)$$

где $\eta_{\text{Г}}$ – КПД дизель- и бензогенератора, о.е.; $\eta_{\text{сзу}}$ – КПД сетевого зарядного устройства, о.е.; $e_{\text{Г}}$ – энергетический эквивалент топлива, МДж/кг; $Q_{\text{ТГСУ}}$ – расход топлива бензоагрегата смесительного узла, кг/га; $e_{\text{оп}}$, $e_{\text{вр}}$, $e_{\text{а}}$ – энергетический эквивалент операторов, вспомогательных рабочих и аналитиков, МДж/чел.-ч; $n_{\text{оп}}$, $n_{\text{вр}}$, $n_{\text{а}}$ – удельная трудоемкость операторов, вспомогательных рабочих обслуживающих агрегат и аналитиков, чел.-ч/га.

Косвенные энергетические затраты БАС рассчитываются:

$$E_{\text{косв}} = E_{\text{трансп}} + E_{\text{инфра}}, \quad E_{\text{трансп}} = e_{\text{трансп}} \cdot d \cdot m, \quad E_{\text{инфра}} = E_{\text{сервер}} + E_{\text{данные}}, \quad (23)$$

где $E_{\text{трансп}}$ – энергоемкость транспортировки, МДж/га; $E_{\text{инфра}}$ – инфраструктурные энергозатраты, МДж/га; $e_{\text{трансп}}$ – удельная энергоемкость транспорта, МДж/(кг·км); d – расстояние транспортировки, км; m – удельная масса груза кг/га; $E_{\text{сервер}}$ – энергозатраты на серверную обработку данных, МДж/га; $E_{\text{данные}}$ – энергия на передачу данных, МДж/га.

Энергозатраты на серверную обработку и передачу данных могут быть выражены:

$$E_{\text{сервер}} = 3,6 \cdot P_{\text{сервер}} \cdot t_{\text{обр}}, \quad E_{\text{данные}} = D \cdot e_{\text{передачи}}, \quad (24)$$

где $P_{\text{сервер}}$ – мощность сервера, кВт; $t_{\text{обр}}$ – время обработки данных 1 га, ч/га; D – объем передаваемых данных, Гб; $e_{\text{передачи}}$ – удельная энергоемкость передачи данных, МДж/Гб·га.

Общая формула для определения критерия экономической эффективности $K_{\text{ЭНЭ}}$ примет вид:

$$K_{\text{ЭНЭ БАС}} = \frac{E_{\text{баз ТР}} - (E_{\text{уд БПЛА}} + E_{\text{зу}} + E_{\text{см у}} + E_{\text{перс}} + E_{\text{трансп}} + E_{\text{инфра}})}{E_{\text{баз ТР}}} \quad (25)$$

Совместное применение критериев позволяет сельскохозяйственным предприятиям проводить комплексную оценку целесообразности внедрения БАС, выбирать оптимальные типы аппаратов и режимы их эксплуатации (таблица 1).

Таблица 1 – Сводная таблица критериев с порогами эффективности и весовыми коэффициентами

Технология	$K_{\text{ЭКЭ}}$	$K_{\text{ЭНЭ}}$	$K_{\text{ЭКЭ}} + K_{\text{ЭНЭ}}$	Есов БАС, МДж/га
Мониторинг				
Традиционная	1	1	1	120
БАС без методологии	3,3–4,8	4,17–5,18	7,74–8,98	28,57–28,69
БАС с методологией	5,9–7,6	4,60–5,65	10,50–12,25	25,98–26,07
БАС + ПО и средства	8,2–10,5	4,65–6,69	13,3–16,1	24,0–26,0
Внесение СЗР и удобрений				
Традиционная	1	1	–	360
БАС без методологии	3,5–4,6	10,84–16,26	14,3–20,9	157,9–236,7
БАС с методологией	6,1–8,6	12,9–20,5	19,0–29,0	153,3–231,2
БАС + ПО и средства	8,5–10,3	14,6–22,2	21,2–32,5	151,9–227,7

Переход от традиционной технологии к использованию БАС без применения методологии уже дает положительный качественный эффект, но ощутимый количественный рост экономической и энергетической эффективности достигается только при системном внедрении методологии, а максимальные значения критериев обеспечиваются при дополнительном использовании разработанного специализированного ПО и технических средств.

Приводится синтез системы и методология повышения эксплуатационной эффективности БАС в АПК (рисунок 1).

Получена система уравнений M , описывающая метеорологический параметр деятельного и приземного слоев при проведении работ с БАС, позволяющая определить скорость ветра на высотах от 2 до 150 м в зависимости величины солнечной радиации, тепло- и влаго- переноса для различных культур и их фаз развития:

$$M = \begin{cases} R = (S_{\text{п}} + s_{\text{р}}) \cdot (1 - \alpha_0) \\ E_{\text{и}} = A \cdot d_{\text{пар}} \cdot \frac{f_2 - f_1}{h_n - h_1} \\ T_{\text{п}} = \Theta \cdot \frac{t_2 - t_1}{z_2 - z_1} \\ Q_{\text{пв}} = c_p \cdot \rho_{\text{в}} \cdot k \cdot \frac{t_2 - t_1}{z_2 - z_1} \\ u_n = u_1 \cdot \left(\frac{h_n}{h_1}\right)^{\theta}; \\ h_n = 2 \div 10, 15 \div 150 \\ u_n = u_1 \cdot \frac{h_n^{\theta} - z_0^{\theta}}{h_1^{\theta} - z_0^{\theta}}; u_n \leq 5 \\ u_n = \frac{R - E_{\text{и}} - T_{\text{п}}}{c_p \cdot \rho_{\text{в}} \cdot k \cdot (t_2 - t_1)} \end{cases}, \quad (26)$$

где R – солнечная радиация, Вт/м²; $S_{\text{п}}$ – прямая радиация, Вт/м²; $s_{\text{р}}$ – рассеянная радиация, Вт/м²; α_0 – отражательная способность деятельной поверхности, о.е.; $E_{\text{и}}$ – расход тепла на испарение, кал/м³; A – коэффициент обмена г/м²; $d_{\text{пар}}$ – теплота парообразования, кал/г; $\frac{f_2 - f_1}{h_n - h_1}$ – приближенный вертикальный градиент удельной влажности, %; h_n – высота полета, м; h_1 – высота, с известной скоростью ветра, м/с; $T_{\text{п}}$ – тепловой поток, кал/м²;

$\frac{t_{\text{п2}} - t_{\text{п1}}}{z_2 - z_1}$ – вертикальный температурный градиент, К; $z_2 - z_1$ – разность глубин, м; Θ – температуропроводность, м²/с; c_p – удельная теплоемкость воздуха, кал/г град; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, кг/м³; k – коэффициент турбулентности, м²/с; $(t_2 - t_1)$ – разница температур на двух высотах, °С; u_n – скорость ветра на расчетной высоте, м/с; u_1 – скорость ветра на высоте h_1 , м/с; θ – коэффициент стратификации, о.е.; z_0 – показатель шероховатости подстилающей поверхности, м.

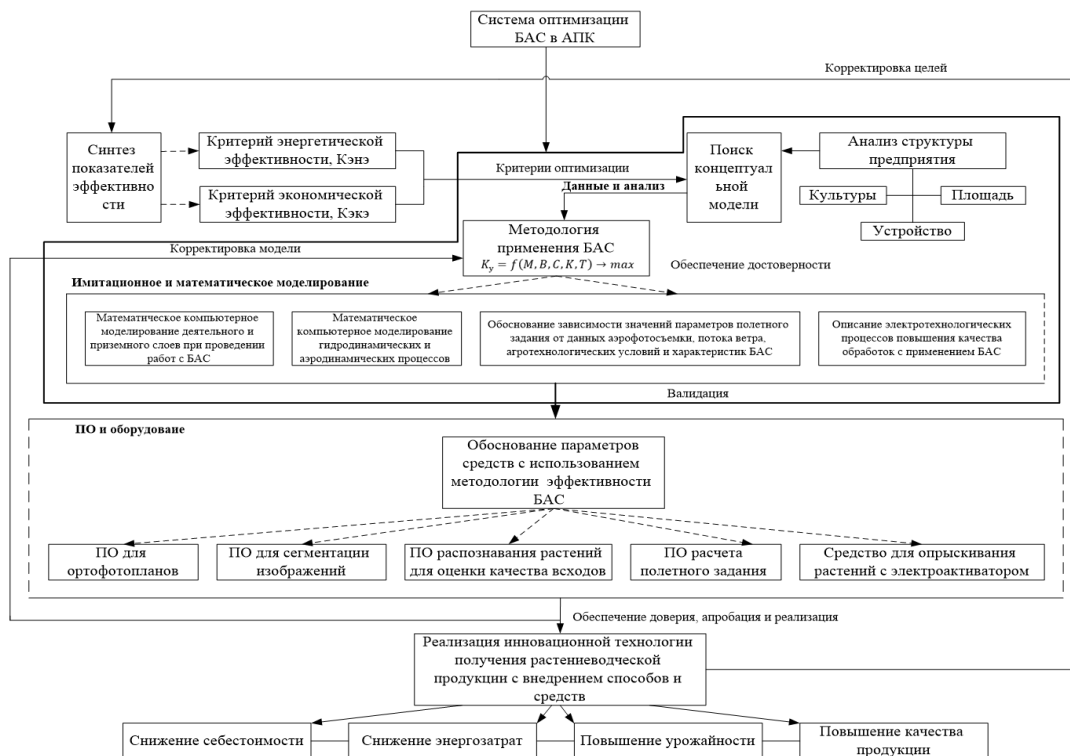


Рисунок 1 – Синтез системы и методология повышения эксплуатационной эффективности БАС

Для построения рационального полетного задания при опрыскивании или разбрасывании удобрений в границах поля разработана компьютерная модель движения воздушных потоков от лесополос в программной среде COMSOL Multiphysics. Модель учитывает: различные типы лесополос; расстояние между ними; скорость и направление ветра; температуру и влажность воздуха; перепад высот рельефа. Приводятся результаты моделирования распространения ветра между лесополосами (рисунок 2).

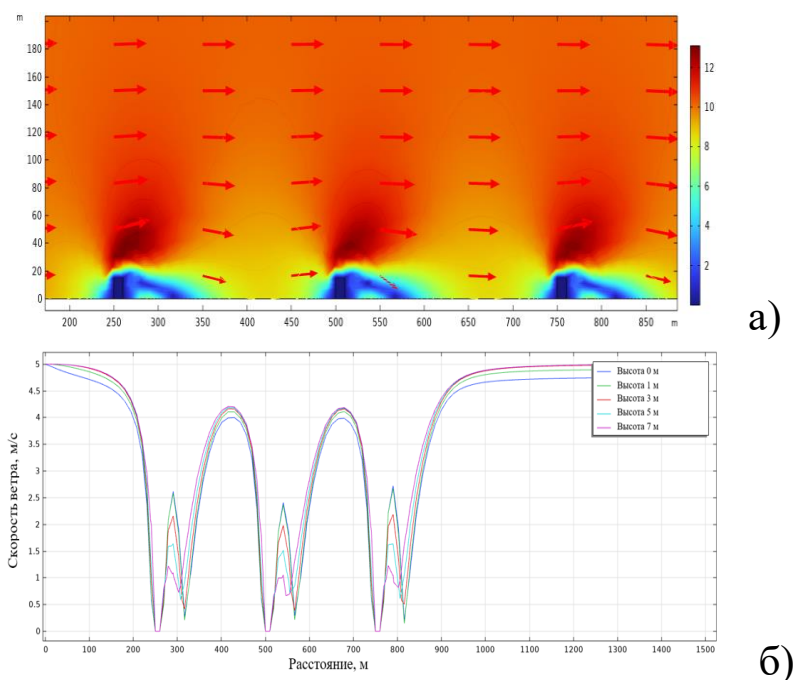


Рисунок 2 – Изображения результатов моделирования:

- а) – распространение ветра между лесополосами;
 б) – график распределения ветра

С практической точки зрения модель дает возможность оператору БАС в реальных условиях определять параметры и режимы полета и обработки, что непосредственно сказывается на качестве проведения работ, расходе препаратов для обработки и в конечном итоге на урожайности.

Получена система уравнений V , описывающая гидродинамические и аэродинамические процессы при обработке технологическими растворами с помощью БАС и связывающие метеорологические условия, размер осаждаемых капель и площадь покрытия с высотой, скоростью полета и нормой расхода рабочей жидкости, позволяет упрощено производить расчет расхода рабочей жидкости:

$$B = \left\{ \begin{array}{l} t_{\text{искап}} = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot (d_{\text{к}}^2 - d_{\text{п}}^2)}{8 \cdot \psi \cdot (C_0 - C_{\infty}) \cdot \left[2 + 0,6 \sqrt{\frac{d_{\text{к}} \cdot v_i}{u_n}} \sqrt{\frac{u_n}{\psi}} \right]}; \\ d_{\text{к}} = 50 \div 300 \\ Stk = \frac{d_{\text{к}}^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot v_i}{18 \cdot \eta_{\text{в}} \cdot l}; v_i \geq 3u_n \\ k_E = \frac{Stk^3}{Stk^3 + 0,775Stk^2 + 0,22} \cdot 100\%; k_E = 0,7 \div 0,8 \\ We = \frac{d_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot v_i^2}{2 \sigma_{\text{ж}}}; We \leq 2 \\ B_{\text{ш}} = L_{\text{ф}} + 2 \cdot h_n \cdot \tan\left(\frac{\alpha_{\text{ф}}}{2}\right); h_n > 1, h_n = 2 \div 7 \\ q_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{мин}} \cdot 600}{B_{\text{ш}} \cdot v} \cdot \left(\frac{B_{\text{ш}}}{B_{\text{ш0}}}\right)^2 \cdot \left(1 + \frac{100 - k_E}{100}\right); q_{\text{пр}} > D_{\text{пр}} \\ N_{\text{к}} = -370,9181 + 118,3492 h_n + 19,2417 q_{\text{пр}} - 2,2907 h_n^2 - \\ - 11,7075 h_n q_{\text{пр}} + 10,5708 q_{\text{пр}}^2 \\ S_{\text{к}} = -9,8694 + 6,6313 h_n - 0,8267 q_{\text{пр}} - 0,2637 h_n^2 - \\ - 0,33 h_n q_{\text{пр}} + 1,0117 q_{\text{пр}}^2 \\ N = 20 \div 100, S \rightarrow \max \end{array} \right. , \quad (27)$$

где $t_{\text{искап}}$ – время испарения капли, с; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность частицы, кг/м³; $d_{\text{к}}$ – первоначальный размер капли раствора, м; $d_{\text{п}}$ – диаметр капли препарата после испарения из нее воды, м; ψ – коэффициент диффузии, см²/с; C_0 – концентрация насыщенного водяного пара, г/см³; C_{∞} – концентрация водяного пара, г/м³; Stk – критерий Стокса, о.е.; v_i – индуктивная скорость воздуха от i -го винта, м/с; $\eta_{\text{в}}$ – вязкость воздуха, Н·с/м²; l – размер обтекаемого препятствия, м; k_E – коэффициент захвата, о.е.; We – критерий Вебера; d_m – средний диаметр капель, м; $\sigma_{\text{ж}}$ – поверхностное натяжение жидкости, Н/м; $B_{\text{ш}}$ – ширина захвата, м; $L_{\text{ф}}$ – расстояние между форсунками, м; h_n – высота полета БАС, м; $\alpha_{\text{ф}}$ – угол распыла форсунки, град; $q_{\text{пр}}$ – норма расхода рабочего раствора, л/га; $Q_{\text{мин}}$ – общий расход всех форсунок, л/мин; $B_{\text{ш0}}$ – базовая ширина захвата, м. v – скорость полета БПЛА, м/с; $N_{\text{к}}$ – количество капель, шт/м²; $S_{\text{к}}$ – площадь покрытия, м².

В COMSOL Multiphysics разработана модель, позволяющая качественно и количественно оценить структуру воздушного потока, создаваемого вращающимися лопастями БПЛА (рисунок 3).

Такая модель корректно отражает основные вихревые структуры в плоскости вращения, зоны ускорения и торможения потока перед лопастями и за ними, а также влияние частоты вращения на поле скорости. Модель может быть применена для предварительных оценок разных типов БАС и построения полетного задания с учетом перекрытий при внесении рабочего раствора.

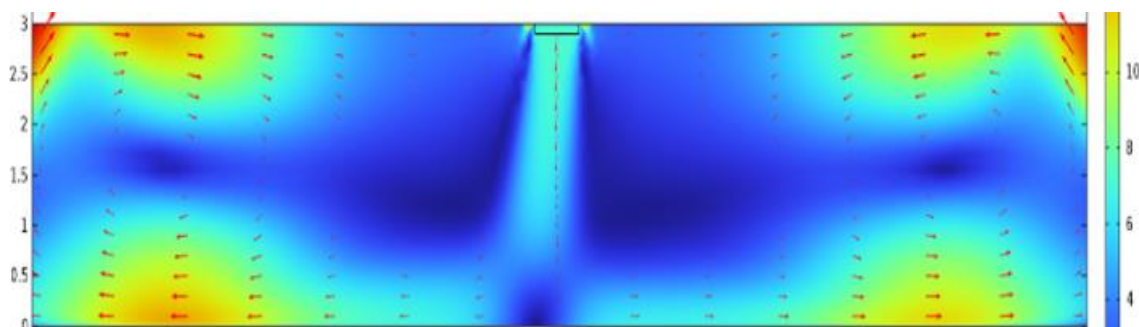


Рисунок 3 – Изображение моделирования воздушных потоков БПЛА

Для определения параметров полетного задания разработана номограмма расчета параметров опрыскивания с БПЛА (рисунок 4).

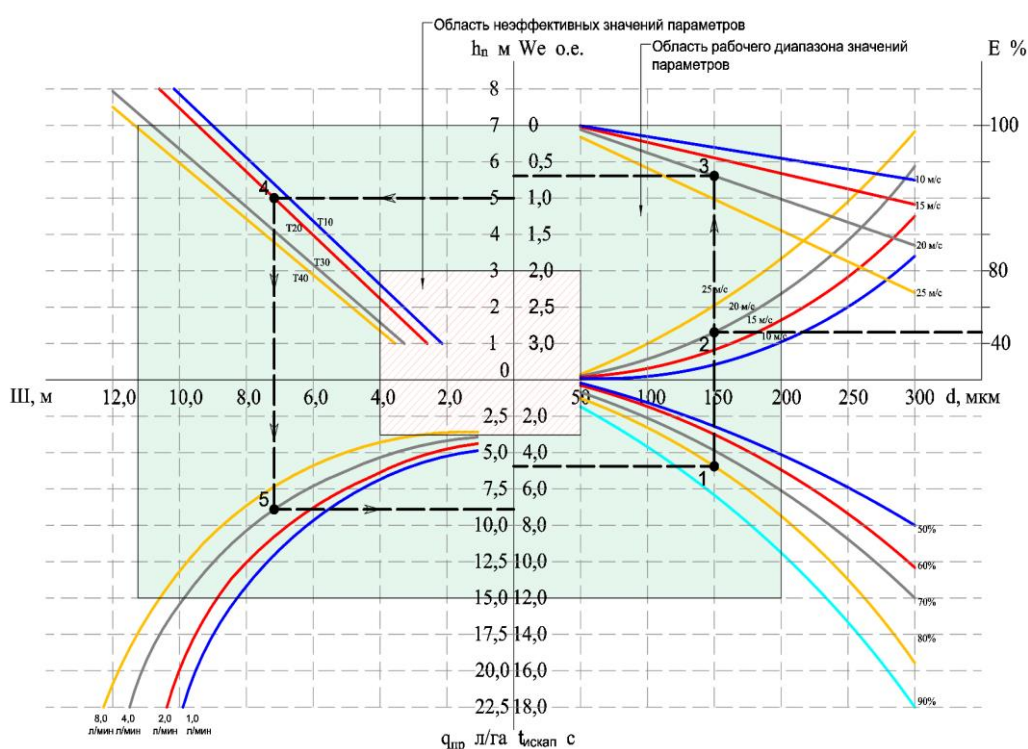


Рисунок 4 – Номограмма расчета параметров опрыскивания с БПЛА

Получена система уравнений Т1, которая описывает электротехнологические процессы повышения качества обработок с применением БАС, конкретно параметры раствора на выходе из электроактиватора и его режим работы для всех видов химических средств защиты растений: гербицидов, фунгицидов, инсектицидов и десикантов.

Добиться повышения качества обработки рабочим раствором возможно, так же прибегая к электротехнологическим способам, повышая плотность осаждения капель и снижая потери рабочей жидкости, путем внедрения системы электростатической подзарядки капель.

$$T1 = \left\{ \begin{array}{l} C(t) = C_0 \cdot e^{-(k_{\text{гидр}} + k_{\text{компл}} + k_{\text{терм}}) \cdot t} \\ C(t) = C_0 \cdot e^{-(0,1[OH^-] + 0,05[Ca^{2+}] + 0,001 \cdot e^{-60/RT}) \cdot t} \\ C(t) = C_0 \cdot e^{-(0,01[OH^-] + 0,002 \cdot e^{-80/RT}) \cdot t} \\ C(t) = C_0 \cdot e^{-(0,2[OH^-] + 0,3[Ca^{2+}] + 0,005 \cdot e^{-50/RT}) \cdot t} \\ t_{\text{вых}} = \left(t_{\text{исх}} + \frac{\frac{Q_{\text{ан}}}{Q_{\text{кат}}} \cdot (1 - Y_{\text{опр}})}{(K_c - 1)} \right) \cdot \frac{V_r}{V_k}; t_{\text{вых}} = 15 \div 25 \\ pH_a = (pH_{\text{нач}} - 7,5) + \left(\frac{6,32 + 0,025Q - 0,1735I + 0,0023 QI -}{-0,00017Q^2 - 0,0068I^2} \right), \quad (28) \\ pH_a = 5 \div 7 \\ I = \frac{F \cdot (C_n - C_k) \cdot Q_{\text{ан}}}{n \cdot \eta}, \quad I \rightarrow \min \\ P_{\text{ан}} = \frac{I^2 \cdot \theta \cdot L}{C_{\text{кан}} \cdot [1 + \kappa_t \cdot (t_{\text{вых}} - 18)] \cdot S_{\text{эл}}}, \quad P_{\text{ан}} \rightarrow \min \\ W_{\text{общ}} = \frac{I}{Q} \cdot \left[\frac{X_d \cdot S_d \cdot \delta}{\Delta l_d \cdot \varepsilon^2} + \frac{I \cdot \theta \cdot K_k}{[1 + \kappa_t \cdot (t_{\text{вых}} - 18)]} \cdot \left(\frac{1}{C_{\text{кан}}} + \frac{1}{C_{\text{кат}}} \right) \right], \\ W_{\text{общ}} \rightarrow \min \end{array} \right.$$

где $C(t)$ – концентрация препарата в растворе, моль/м³; C_0 – начальная концентрация препарата, моль/м³; $k_{\text{гидр}}(pH)$ – постоянная скорости гидролиза, о.е.; $k_{\text{компл}}(Ca^{2+}, Mg^{2+})$ – постоянная скорости образования нерастворимых комплексов, о.е.; $k_{\text{соль}}(M)$ – ионная сила раствора, о.е.; $k_{\text{терм}}(T)$ – постоянная термического разложения, о.е.; $t_{\text{вых}}$ – температура раствора на выходе, °C; $t_{\text{исх}}$ – температура воды на входе в камеры, °C; $Q_{\text{ан}}$ и $Q_{\text{кат}}$ – производительность анолита и католита, м³/с; $Y_{\text{опр}}$ – коэффициент опреснения, о.е.; K_c – коэффициент концентрации, о.е.; V_r – объем выделяющегося в камерах газа, м³; V_k – объем камеры, м³; pH_a – водородный показатель анолита; $pH_{\text{нач}}$ – водородный показатель воды; I – величина силы тока, А; F – число Фарадея; C_n – начальная концентрация раствора, моль/м³; C_k – конечная концентрация раствора, моль/м³; $Q_{\text{ан}}$ – производительность анолита, м³/с; n – число ячеек в электроактиваторе; η – выход по току, о.е.; $P_{\text{ан}}$ – мощность анодной камеры, Вт; θ – коэффициент электрической проводимости, моль/(См·м²); L – длина канала, м; κ_t – температурный коэффициент, 1/°C; $S_{\text{эл}}$ – площадь электрода, м²; $W_{\text{общ}}$ – затраты электроэнергии Вт·ч/ м³; X_d – удельная электропроводимость электролита в диафрагме, См/м; S_d – площадь диафрагмы, м²; δ – объемная пористость диафрагмы, о.е.; Δl_d – толщина диафрагмы, м; ε – коэффициент извилистости пор диафрагмы, о.е.; K_k – конструктивный параметр, о.е.; $C_{\text{кан}}$ – минерализация анолита, моль/м³; $C_{\text{кат}}$ – минерализация католита, моль/м³.

Получена система уравнений, которая позволяет учесть электростатические процессы при опрыскивании:

$$T2 = \begin{cases} m_k \frac{d\vec{v}_k}{dt} = \vec{F}_T + \vec{F}_{\text{аэр сопр}} + \vec{F}_e \\ q_{\max} = 8\pi\sqrt{\sigma_{\text{ж}}\varepsilon_0 d_k^3}; d_k = 50 \div 300, \\ \eta = \eta_0 \exp[-\varpi(\text{Stk} - \text{Stk}_{\text{крит}})^2]; \\ E = 0,7 \div 0,8, C_{\text{факт}} = 20 \div 100 \end{cases}, \quad (29)$$

где m_k – масса капли, кг; $\vec{v}_k$ – скорость капли, м/с; t – время нахождения в поле, с; $\vec{F}_T$ – сила тяжести, Н; $\vec{F}_{\text{аэр сопр}}$ – сила аэродинамического сопротивления, Н; $\vec{F}_e$ – электростатическая сила, Н; ε_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; η – эффективность улавливания, о.е.; η_0 – максимальная эффективность улавливания, о.е.; ϖ – параметр формы кривой; $\text{Stk}_{\text{крит}}$ – критическое значение критерия Стокса.

Получена математическая модель мониторинга сельскохозяйственных объектов C , определяющая параметры полетного задания от данных аэрофотосъемки, потока ветра и агротехнологических характеристик:

$$C = \begin{cases} K_{\text{расп}} = e^{-(\epsilon \frac{GSD}{S_{\text{об}}})^2}; K_{\text{расп}} \rightarrow \max \\ GSD = \frac{h_n \cdot M}{f \cdot L}, GSD = \frac{h_n \cdot IFOV}{100}, GSD = \frac{v}{PRF}; GSD = 0,5 \div 7 \\ l = \frac{L \cdot GSD}{100} \\ B_x = l_x \cdot \left(1 - \frac{P_x}{100}\right), B_y = l_y \cdot \left(1 - \frac{P_y}{100}\right), L_M = 2 \cdot h_n \cdot \tan\left(\frac{\gamma_{\text{лид}}}{2}\right); \\ h_n = 15 \div 150 \\ N_{\text{уч}} = N_M \cdot N_{CH}; N_{\text{уч}} \rightarrow \min \\ D_{\text{орто}} = N_{\text{уч}} \cdot D_{\phi}, D_{\text{орто}} = N_{\text{уч}} \cdot N_{\text{кан}} \cdot D_{\phi}, D_{\text{орто}} = \frac{a \cdot b \cdot D_{\text{точ}} \cdot BPP_{\text{точ}}}{10^9} \\ t_{\text{уч}} = \frac{N_M \cdot a}{v + u_n \cos(\varphi_{\text{БПЛА}} - \varphi_{\text{В}})} + \frac{(N_M - 1) \cdot 3B_x}{v_p} + \frac{h_n}{v_{\text{вз}}} + \frac{h_n}{v_{\text{пос}}}; t_{\text{уч}} \rightarrow \min \\ W_{\text{уч}} = P_{\text{пол}} \cdot t_{\text{уч}} \cdot \left(1 - k_a \cdot \frac{u_n \cos(\varphi_{\text{БПЛА}} - \varphi_{\text{В}})}{\gamma_{\text{лид}}}\right); W_{\text{уч}} \leq W_6 \end{cases}, \quad (30)$$

где $K_{\text{расп}}$ – искомая вероятность распознавания, ед.; ϵ – коэффициент распознавания, рх/ед.; GSD – пространственное разрешение снимка, см/рх; $S_{\text{об}}$ – размер объекта, см; M – размер матрицы, рх; f – фокусное расстояние, мм; L – размер кадра, рх; $IFOV$ – разрешение тепловизора, мрад; PRF – частота импульсов, кГц; l – размер изображения на местности, м; B_x и B_y – расстояние между изображениями, м; P_x и P_y – продольное и поперечное перекрытие изображений, %; L_M – ширина маршрута на местности, м; $\gamma_{\text{лид}}$ – угол сканирования лидара, град; $N_{\text{уч}}$ – количество снимков на участок, шт.; N_M – количество маршрутов, шт.; N_{CH} – количество изображений, шт.;

$D_{\text{орто}}$ – объем данных, ГБ; $D_{\text{ф}}$ – объем данных одной фотографии, ГБ; $D_{\text{точ}}$ – плотность точек, шт./м²; $BPP_{\text{точ}}$ – размер точки, байт/точку; $t_{\text{уч}}$ – времена на аэрофотосъемку, с; $\varphi_{\text{БПЛА}}$ – курсовой угол, град; $\varphi_{\text{в}}$ – угол направления ветра, град; $v_{\text{р}}$ – скорость на разворотах, м/с; $v_{\text{вз}}$ – скорость при взлете, м/с; $v_{\text{пос}}$ – скорость при посадке, м/с; $W_{\text{уч}}$ – энергия, требуемая для полета, Дж; $P_{\text{пол}}$ – мощность БПЛА во время полета, Вт; k_a – эмпирический коэффициент, о.е.; W_6 – номинальная запасаемая энергия в АКБ, Дж.

Получена система уравнений K показывающая зависимость значений параметров полетного задания от характеристик БАС.

$$K = \begin{cases} T = \sqrt{mg^2 + \frac{\rho_{\text{в}} \cdot C_x \cdot S_{\text{пов}} \cdot v^2}{2}} \\ v_i = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{2n\pi r^2 \rho_{\text{в}} \cdot \sqrt{v^2 \cos^2 \phi + (v \sin \phi + v_i^2)^2}} \\ P_p = k_h \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho_{\text{в}} S}} \\ P_{\text{пот}} = (T \cdot v_i + F_{\text{сопр}} \cdot v) + P_r, \\ P_r = \frac{1}{2} \rho_{\text{в}} v^2 S C_0 + \frac{2P_h^2 K_{1a}}{\rho_{\text{в}} v S} \\ E_{\text{п}} = \frac{T}{\frac{(K_{1a} \rho_{\text{в}})^{\frac{3}{2}}}{K_{2a} \rho_{\text{в}} D}} = \frac{DK_{1a}^{\frac{3}{2}}}{K_{2a}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{в}}}{T}} \end{cases} \quad (31)$$

где T – тяга для поднятия БПЛА, Н; C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, о.е.; $S_{\text{пов}}$ – площадь поверхности БПЛА в направлении движения, м²; T_i – тяга i -го винта, Н; P_p – мощность, необходимая для висения, Вт; k_h – технологический коэффициент, о.е.; S – ометаемая площадь винта, м²; $P_{\text{пот}}$ – потребляемая мощность БПЛА во время полета, Вт; $F_{\text{сопр}}$ – сила лобового сопротивления, Н; P_r – мощность, необходимая для преодоления аэродинамического сопротивления, Вт; C_0 – сила трения о корпус, Н; K_{1a} – коэффициент тяги, о.е.; K_{2a} – коэффициент мощности винта, о.е.; $E_{\text{п}}$ – эффективности винта, г/Вт; D – диаметр винта, м.

В программном комплексе SimInTech разработана имитационная компьютерная модель (ИКМ) автономного источника энергообеспечения БАС (рисунок 5), позволяющая: анализировать режимы работы генератора электроэнергии с построением нагрузочной характеристики; рассчитать необходимое количество топлива приводного двигателя или электроэнергии на выполнение операции и определить установленную мощность генератора. Расхождение расчетных и фактических затрат топлива составило 8,9 %.

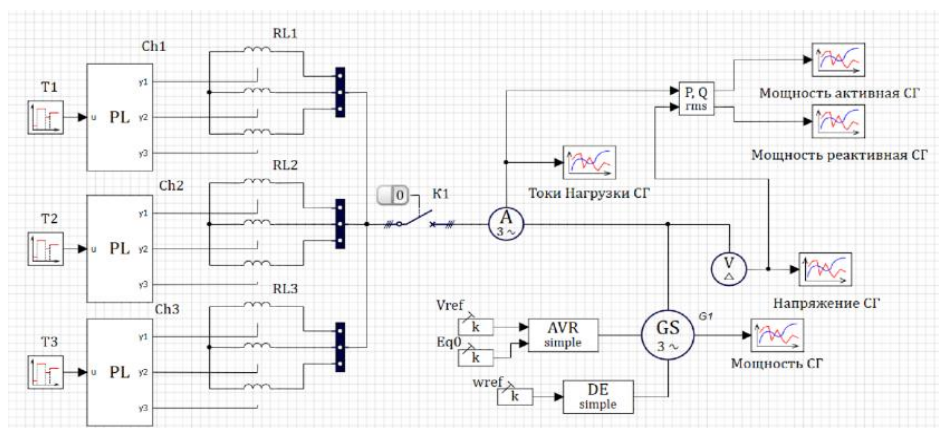
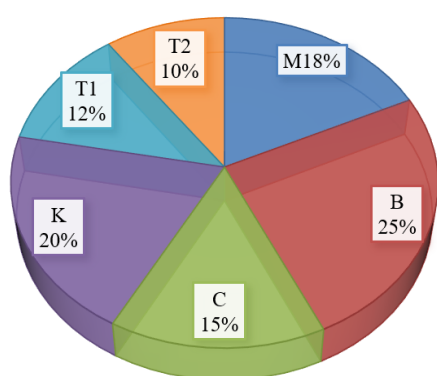
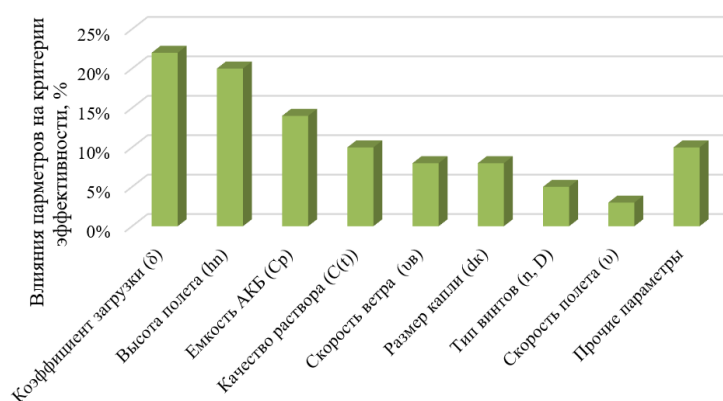


Рисунок 5 – Имитационная компьютерная модель автономного источника

На основе разработанных математических, имитационных и компьютерных моделей и инженерных методик сформирован оригинальный подход к повышению эксплуатационной эффективности БАС при выполнении ключевых технологических операций в цифровом земледелии. Разработанные модели методологии и их параметры вносят вклад в рост критериев эффективности (рисунок 6).



а)



б)

Рисунок 6 – Диаграммы вклада моделей и параметров в $K_{экз}$:

а) – вклад моделей; б) – гистограммы влияния параметров

Получены интервалы значений слагаемых критерия экономической и энергетической эффективности при традиционном использовании БАС и в результате применения инноваций.

В третьей главе разработан алгоритм и ПО для обработки изображений и построения ортофотоплана. ПО ориентировано на агрономических специалистов, с упрощенным интерфейсом и инструментарием, адаптированным под задачи растениеводства. Реализованы алгоритм работы и ПО по сегментации областей изображений и распознавания для оценки качества всходов (Свидетельство о регистрации

программ для ЭВМ № 2026618410). Программа позволяет автоматически подсчитывать количество растений на ортофотоплане (рисунок 7). Скорректирована формула для определения вероятности распознавания.

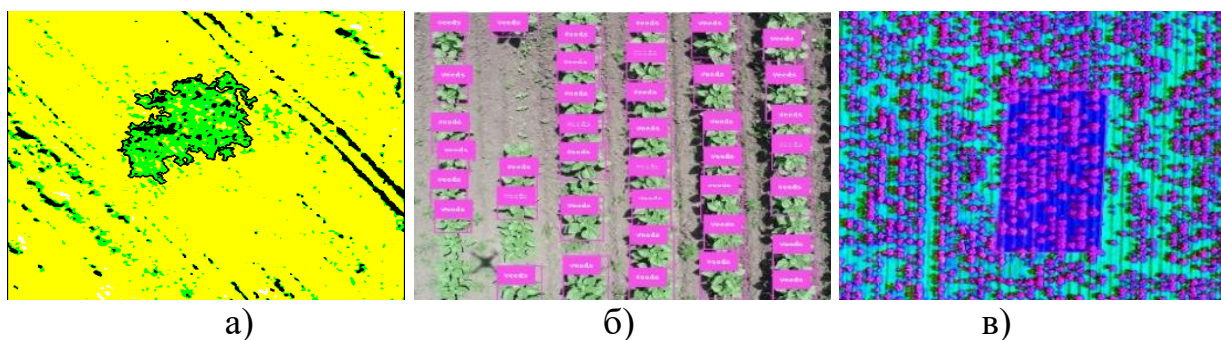
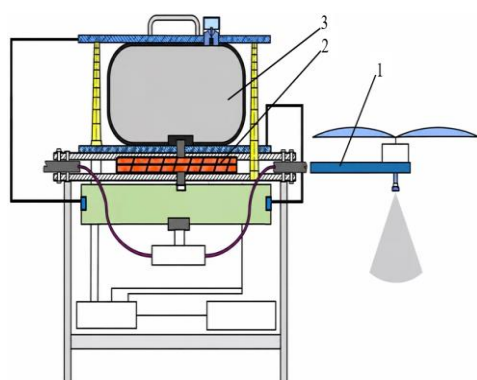


Рисунок 7 – Скриншот ортофотоплана с результатами работы ПО:
а) – распознавание очага просянки; б) – распознавание всходов подсолнечника;
в) – контрольный участок для измерения густоты подсолнечника

Разработан инженерный калькулятор для расчета полетного задания для БАС в различных технологических операциях. Программа представляет собой методологический справочник и инженерный калькулятор для предварительной оценки применения БАС в задачах АПК.



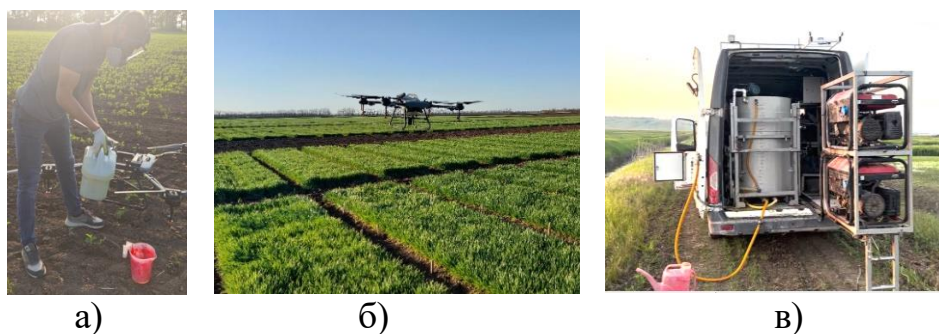
1 – БПЛА;
2 – электроактиватор;
3 – система опрыскивания

Рисунок 8 – Изображение беспилотной летающей системы

Разработана многофункциональная беспилотная летающая система для опрыскивания, включающая проточный электроактиватор для получения анолита и католита (патенты 2789929, 2793489, 2688183, 2644472, 2634277, 2777466, 2643839, рисунок 8).

В четвертой главе приведены результаты полевых испытаний (рисунки 9–10) при выполнении основных технологических операций в растениеводстве на предприятиях Краснодарского края.

Полевые испытания подтверждают эффективность и многофункциональность БАС на всех этапах возделывания культур (таблица 2).



а)

б)

в)

Рисунок 9 – Изображения процесса внесения СЗР

а) – приготовление раствора; б) – внесение СЗР; в) – растворный узел

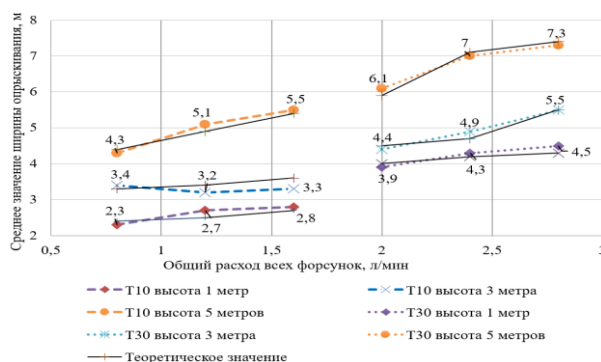


Рисунок 10 – График сопоставления теории и эксперимента зависимости ширины обработки от высоты полета и расхода рабочего раствора

Таблица 2 – Значения коэффициентов и критериев экономической и энергетической эффективности

Показатель	Экспериментальные данные	Теоретическое значение
$K_{\text{рент}}$	3,2	0–3,4
$K_{\text{уст}}$	1,18	0,80–1,25
$K_{\text{вод рес}}$	0,96	0,80–0,98
$K_{\text{зам}}$	0,9	0,50–0,99
$K_{\text{пров}}$	1,53	0,3–2,0
$K_{\text{экол}}$	0,8	0,70–0,99
$E_{\text{уд БПЛА}}$, МДж/га	1,5	1,00–1,93
$E_{\text{зу}}$, МДж/га	8,0	4,16–8,04
$E_{\text{сму}}$, МДж/га	13,24	10,17–14,53
$E_{\text{перс БАС}}$, МДж/га	2,50	2,50–3,75
$E_{\text{уд БАС}}$, МДж/га	25,24	17,83–28,26
$E_{\text{трансп}}$, МДж/га	169,0	135,0–202,5
$E_{\text{инфра БАС}}$, МДж/га	0,08	0,49–0,52
$E_{\text{сов БАС}}$, МДж/га	194,32	153,32–231,28
$K_{\text{экэ}}$	8,57	8,5–10,3
$K_{\text{энэ}}$	15,46	14,75–22,22

Достигается: повышение урожайности; экономия удобрений и воды; снижение энергозатрат; улучшение качества зерна. Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 10 %, что подтверждает адекватность разработанных математических моделей.

В пятой главе на основе классического метода определения чистой приведенной стоимости выполнена технико-экономическая оценка результатов внедрения БАС в растениеводство. Для двух модельных предприятий (300 га и 5000 га) по четырем сценариям (пилотный, частичный, полная интеграция, кооперативный) рассчитаны ключевые финансовые показатели, ЧДД составил 1039,4 руб. и 3560 руб., соответственно. На примере опытной станции Кубанского ГАУ выполнена верификация предложенной методологии. Определены рациональные границы применения БАС, даны практические рекомендации по выбору сценариев внедрения. При увеличении коэффициента загрузки с 0,18 до 0,8 удельные инвестиции снижаются с 24 000 до 3 000 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработана комплексная система критериев экономической и энергетической оценки эффективности эксплуатации БАС, позволяющая связать между собой: параметры БАС, тип и качество технологической операции, экономические, инфраструктурные и энергетические показатели, экологический эффект. Безразмерный критерий экономической эффективности представляет собой сумму частных коэффициентов: рентабельности инвестиций, устойчивости погашения долга, экономии водного ресурса, замещения топлива, производительности мониторинга, производительности внесения СЗР и удобрений, экологической эффективности. Критерий энергетической эффективности характеризует относительное снижение удельных энергозатрат при замене отдельных технологий и позволяет сравнивать различные типы БПЛА.

2. На основе системного анализа технологических операций и разработанной иерархической модели обоснована методология повышения эксплуатационной эффективности БАС и потребность перехода от эмпирического анализа к научно-обоснованному

управлению в рамках системы «атмосфера–БАС–растительность». Ключевыми элементами методологии являются учет структуры предприятия, агротехнических требований, метеорологических факторов и обратных связей между подсистемами. Разработана структура типовых исходных требований на базовые машинно-технологические операции с использованием БАС: агротехнические сроки, зоны применения, условия проведения, акторы технологии, типы интенсивности, производственные процессы, назначение, цели, задачи, способы выполнения, требования к материалам и показатели качества.

3. Разработаны математические компьютерные модели деятельного и приземного слоев атмосферы с системами уравнений гидродинамических и аэродинамических процессов. Получена система уравнений, описывающая процессы испарения, осаждения и сноса капель рабочего раствора с учетом индуктивной скорости воздушных потоков от винтов, коэффициента захвата (40–95 %) и критерия Вебера (0,5–2,0). На основе регрессионного анализа установлены эмпирические зависимости количества капель при внесении СЗР (для различных типов пестицидов 20–100 шт./см²) и площади покрытия от высоты полета (1–5 м) и нормы расхода рабочей жидкости (5–15 л/га). Обоснованы две электротехнологии повышения качества обработок при использовании БАС: электрохимическая активация воды – позволяет за счет корректировки водородного показателя, жесткости и температуры повысить биологическую эффективность пестицидов на 18–30 %; электростатическая зарядка капель – обеспечивает увеличение плотности осаждения, что открывает путь к снижению нормы расхода препаратов и экологической нагрузки.

4. Разработана компьютерная модель в среде COMSOL Multiphysics распределения воздушных потоков, возникающих вблизи лесополос при работе БПЛА на опрыскивании, которая позволяет установить распределение ветра в границах поля при различных скоростях набегающего потока (от 1 м/с до 20 м/с) и углах атаки (от 11 до 79 градусов). Разработана компьютерная модель распространения воздушных потоков, создаваемых вращающимися лопастями БПЛА, которая показала, что на общей области покрытия растений рабочими растворами порядка 20 м значения

скоростей воздуха изменяются от 5 м/с до 20 м/с, а это может привести к неравномерной дозе внесения СЗР.

5. Разработаны математические модели мониторинга сельскохозяйственных объектов для составления полетного задания, учитывающие взаимосвязь: летных характеристик с требуемой вероятностью распознавания объектов, пространственным разрешением (0,5–7 см/рх), параметрами съемки (высота 1–150 м, перекрытия 60–90 %) объемом данных (64–512 ГБ, скорость чтения данных 130 МБ/с) и энергетическими ограничениями БАС (емкостью аккумуляторов 2970–50000 мАч), типом компоновки конструкции (квадро-, гексо-, октокоптеры), параметрами винтов. Модели позволяют строить полетное задание по критериям минимизации времени обследования с учетом скорости и направления ветра, количества снимков и энергии, требуемой для полета.

6. Разработана имитационная компьютерная модель (ИКМ) автономного источника энергоснабжения БАС, позволяющая: анализировать режимы работы генератора электроэнергии с построением нагрузочной характеристики; рассчитать необходимое количество топлива приводного двигателя (0,3–0,8 л/ч при мониторинге и 1,5–4,5 л/ч при внесении СЗР и удобрений) или электроэнергии на выполнение операции (0,04–0,14 МДж/га при мониторинге и 3–12 МДж/га при внесении СЗР и удобрений), и определить установленную мощность генератора (1–3 кВт для мониторинга и 5–10 кВт для внесения СЗР и удобрений).

7. Разработана укрупненная последовательность определения эксплуатационной эффективности БАС и установлены следующие интервалы значений показателей эффективности мониторинга: коэффициент экономической эффективности составит 3–5, энергетической – 3–6. При применении специализированных средств и программного обеспечения диапазон изменится: 8–10 для экономической составляющей и 5–7 для энергетической. При внесении СЗР и удобрений диапазон коэффициента экономической эффективности составит 3–5, энергетической эффективности – 12–14; при применении специализированных средств и программного обеспечения станет 8–11 и 14–22 соответственно.

8. Предложены алгоритмы и программное обеспечения для обработки изображений, построения ортофотоплана, сегментации

областей изображений и распознавания растений для оценки качества всходов (Свидетельство регистрации программы для ЭВМ № 2026618410). Разработано программное обеспечение для расчета параметров полетного задания БАС в различных технологических операциях. Внедрение предложенных алгоритмов и ПО, увеличивает критерии: экономической эффективности на 13,8–15,0 %; энергетической эффективности – на 5,8–8,1 %. Сокращение времени обработки данных снижает энергетические затраты персонала и энергозатраты на серверную обработку данных на 30 %. Внедрение описанного ПО позволяет повысить лояльность агрономических служб к технологиям точного земледелия.

9. Разработана многофункциональная беспилотная летающая система для опрыскивания растений (патенты 2789929, 2793489, 2688183, 2644472, 2634277, 2777466, 2643839), позволяющая по заданным начальным параметрам воды установить режим работы электроактиватора и получить требуемый анолит. Установлено, что повышение биологической эффективности обработок СЗР за счет активированных растворов и улучшенного осаждения дает прирост урожайности зерновых культур до 5 %. Снижение нормы расхода жидкости при опрыскивании с помощью БАС по сравнению с традиционной технологией увеличивает коэффициент экономии водного ресурса на 0,3. Снижение пестицидной нагрузки за счет лучшей растворимости препарата повышает коэффициент экологической эффективности на 0,15. Общий прирост критерия экономической эффективности в результате внедрения электротехнологии может составить 10,2 %. Установлено снижение совокупных энергозатрат БАС на 5 %, что дает прирост критерия энергетической эффективности на 5,4 %.

10. Применение разработанной методологии с предлагаемыми способами и средствами позволяет получить прирост критерия экономической эффективности на 46,3 %, что подтверждает высокую экономическую эффективность предлагаемого комплекса решений; а прирост критерия энергетической эффективности на 21,9 %. Предлагаемая методология не только решает актуальные финансово-экономические задачи, но и в рамках государственной программы «Приоритет 2030» формирует современную образовательную среду, способствуя подготовке квалифицированных кадров,

владеющих передовыми цифровыми технологиями, что соответствует целям национального проекта «Беспилотные авиационные системы», федерального проекта «Кадры для беспилотных авиационных систем».

11. Проведены полевые экспериментальные исследования при выполнении основных технологических операций на предприятиях Краснодарского края: УОХ «Краснодарское», УОХ «Кубань», АО фирмы «Агрокомплекс» им. Н.И. Ткачева, опытно-семеноводческом хозяйстве (ОСХ) «Березанское», ФГБНУ ФНЦБЗР, ООО «АСТ», ООО «Спец», ООО «ПСК Пластметалл», ООО «Агродом». Комплексное применение БАС на всех этапах возделывания культур (мониторинг, дифференцированное внесение удобрений, обработка СЗР и посев) обеспечивает ресурсосбережение и повышение точности агротехнологий. Результаты полевых испытаний подтверждают эффективность и многофункциональность БАС в инновационной технологии растениеводства возможность интеграции беспилотных технологий в производственные процессы с достижением повышения урожайности, экономии удобрений, снижением энергозатрат и улучшением качественных показателей. Результаты исследований одобрены экспертной научно-технической секцией «Механизация» НТС министерства сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Краснодарского края (2022 г.).

12. На основе расчетов методом чистой приведенной стоимости (NPV) установлено, что внедрение БАС в растениеводство экономически эффективно при соблюдении максимальной загрузки оборудования и правильном выборе сценария. Для малых хозяйств (до 300 га) оптимально частичное внедрение с собственными средствами (окупаемость 2,1 года). Для крупных хозяйств (более 5000 га) эффективна полная интеграция (окупаемость 1,6 года). Ключевой фактор – коэффициент загрузки БАС, при его увеличении с 0,18 до 0,8 удельные инвестиции снижаются с 24 000 до 3 000 руб./га. Основной вклад в эффект вносят качественные факторы (сохраненный урожай, экономия СЗР и воды). Аутсорсинг рекомендуется для хозяйств до 200 га. Кредит снижает NPV на 30–40 %, при льготных ставках (5–7 %) становится сопоставим с собственными средствами. Критерий экономической эффективности коррелирует с NPV ($R^2 = 0,89$). Порог рентабельности – 150 га для

малых и 500 га для крупных хозяйств при загрузке не менее 136 ч/год.

Рекомендации производству

Научно-обоснованные методы, способы и средства повышения эффективности БАС в цифровом земледелии показывают конкурентоспособность по сравнению с традиционными технологиями и способствуют повышению качества мониторинга, внесения СЗР и удобрений, снижают химическую нагрузку на прилегающие агроценозы и водоемы. Разработанные решения могут быть непосредственно использованы инженерными и агрономическими службами предприятий АПК для настройки оборудования и выбора оптимальных режимов работы БАС в зависимости от структуры предприятия, культуры, фазы развития растений и выполняемой задачи. Начинать следует с частичного внедрения, включающего мониторинг и гербицидную обработку, что обеспечивает скорую окупаемость инвестиций, тогда как полная интеграция целесообразна для хозяйств от 1000 га. Рекомендуется внедрять БАС только при годовой загрузке не менее 300–500 га на один аппарат, поскольку при меньших объемах удельные инвестиции делают проект убыточным, а для малых хозяйств до 300 га экономически оправдан аутсорсинг. Для дифференцированного внесения удобрений предпочтительно использовать БАС с RGB-камерой (Биоиндекс) вместо дорогостоящей и энергозатратной технологии мультиспектральной съемки, так как корреляция Биоиндекса с урожайностью составляет 0,84–0,99, экономия удобрений достигает 10–13 кг/га, а капитальные затраты в 5–8 раз ниже, чем у специализированных азотных сканеров. При приготовлении рабочих растворов гербицидов рекомендуется применять электроактивированную воду (анолит), которая повышает биологическую эффективность обработок и дает прирост урожайности.

Производителям БАС рекомендуется разрабатывать и поставлять комплексные модульные системы, объединяющие многофункциональные беспилотные платформы с энергоэффективными рабочими органами и открытым программным обеспечением, что позволит сельхозпредприятиям перейти от эпизодического использования дронов к системному цифровому земледелию. Приоритетными направлениями являются создание универсальных инженерных

калькуляторов для автоматизированного расчета полетных заданий с учетом агротехнологических параметров, а также разработка ПО с возможностью интеграции в среду разработчика БАС, что обеспечит скорую окупаемость инвестиций и сделает технологии БАС доступными для хозяйств любого масштаба.

Перспективы дальнейшей разработки темы

На основе анализа представленных материалов дальнейшая разработка темы должна быть направлена на интеграцию и автоматизацию разработанных методологий в единую динамическую систему автоматизированных рабочих мест операторов, которая позволит перейти от статических расчетов к управлению в реальном времени. Приоритетными направлениями являются совершенствование математических моделей через их объединение и учет сложных микроклиматических факторов, разработка мобильных приложений и интеграция с ГИС-платформами для поддержки принятия решений непосредственно в поле, а также создание самоадаптирующегося бортового ПО для БАС. Особое внимание следует уделить внедрению алгоритмов машинного обучения для повышения точности распознавания и прогнозирования, дальнейшей отработке технических средств, включая автоматизированные смесительные узлы и системы электростатического опрыскивания, а также масштабированию технологий на более широкий спектр культур и агроклиматических условий. Требуется разработка и адаптация большего количества рабочих органов. Необходимы исследования возможности применения новых конструкционных материалов и типов АКБ. Завершающим этапом должна стать экспериментальная верификация и уточнение всех поправочных коэффициентов, стандартизация отраслевых требований, включение в общую систему менеджмента хозяйства и долгосрочный мониторинг эффектов, что в совокупности обеспечит переход от эмпирического применения БАС к научно обоснованному цифровому земледелию.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Курченко, Н. Ю. Анализ конструктивных параметров электроактиватора воды для улучшения его энергетических характеристик / **Н. Ю. Курченко** // Политематический сетевой электронный

научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2014. – № 95. – С. 470–485.

2. Оськин, С. В. Техничко-экономическое обоснование производства и внедрения электроактиваторов / С. В. Оськин, **Н. Ю. Курченко** // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 110. – С. 907–926.

3. Оськин, С. В. Инженерная методика по определению параметров электроактиватора / С. В. Оськин, **Н. Ю. Курченко** // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 107. – С. 1245–1259.

4. Оськин, С. В. Разработка математической модели электроактиватора с учетом данных о качестве воды и требований к рабочему раствору гербицида / С. В. Оськин, **Н. Ю. Курченко** // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – № 107. – С. 1226–1244.

5. Курченко, Н. Ю. Электроактивированные растворы в технологиях точного земледелия / **Н. Ю. Курченко**, Я. А. Ильченко, Р. Г. Кокурин // Сельский механизатор. – 2018. – № 7–8. – С. 8–9.

6. Труфляк, Е. В. Цифровые технологии в АПК / Е. В. Труфляк, **Н. Ю. Курченко**, В. А. Дидыч // Сельский механизатор. – 2018. – № 7–8. – С. 13–14.

7. Труфляк, Е. В. Оценка готовности регионов к внедрению цифровых технологий в сельское хозяйство / Е. В. Труфляк, **Н. Ю. Курченко** // Вестник Самарского государственного экономического университета. – 2019. – № 10(180). – С. 22–26.

8. Компьютерное моделирование на базе Comsol Multiphysics для прогнозирования состояний электроустановок / Г. М. Оськина, Н. С. Баракин, В. А. Дидыч, **Н. Ю. Курченко** // Сельский механизатор. – 2021. – № 6. – С. 12–14.

9. Курченко, Н. Ю. Алгоритм определения урожайности по ортофотоплану / **Н. Ю. Курченко**, А. Я. Ильченко // Сельский механизатор. – 2021. – № 1. – С. 5.

10. Труфляк, Е. В. Преимущество дифференцированного внесения удобрений с использованием индексов вегетации биоиндекса

и NDVI / Е. В. Труфляк, **Н. Ю. Курченко**, М. Даду // Сельский механизатор. – 2022. – № 7. – С. 22–23.

11. Курченко, Н. Ю. Моделирование режимов работы автономного источника для беспилотных летательных аппаратов в программе SIMINTECH / **Н. Ю. Курченко**, Н. С. Баракин // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2023. – № 5(74). – С. 113–120.

12. Параметры применения беспилотных летательных аппаратов при обработке средствами защиты растений сельскохозяйственных культур / **Н. Ю. Курченко**, Ю. В. Даус, Е. В. Труфляк, Я. А. Ильченко // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2023. – № 1(69). – С. 527–536.

13. Оськин, С. В. Энергетическая и экономическая оценка применения агродронов в АПК / С. В. Оськин, Л. В. Назаренко, **Н. Ю. Курченко** // Сельский механизатор. – 2025. – № 9. – С. 3–12.

14. Курченко, Н. Ю. Компьютерное моделирование для совершенствования технологии опрыскивания с использованием агродронов / **Н. Ю. Курченко** // Сельский механизатор. – 2025. – № 10. – С. 11–13.

15. Курченко, Н. Ю. Параметры оптимизации внесения средств защиты растений беспилотными аппаратами / **Н. Ю. Курченко** // Сельский механизатор. – 2025. – № 11. – С. 3–5.

16. Курченко, Н. Ю. Методология применения БАС для мониторинга объектов энергетической инфраструктуры / **Н. Ю. Курченко** // Энергосбережение и водоподготовка. – 2025. – № 5(157). – С. 15–19.

17. Курченко, Н. Ю. Эффективность распознавания растений в системе точного земледелия с применением БПЛА / Н. Ю. Курченко // Техника и оборудование для села. – 2026. – № 4(346). – С. 8–13.

*Публикации в изданиях, индексируемых
в международных базах данных:*

18. Comparative tests of differentiated fertilizer application for wheat using task cards and nitrogen scanner / Е. V. Truflyak, **N. Yu. Kurchenko**, V. E. Kuryan, D. Mones // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 285. – P. 01016.

19. Oskin, S. V. Stochastic models of energy audit organization in agrarian enterprises / S. V. Oskin, S. M. Morgun, **N. Y. Kurchenko** // Engineering Economics: Decisions and Solutions from Eurasian Perspective. – Cham: Springer Nature, 2021. – P. 495–505.

20. Oskin, S. V. Electroactivator for Pesticide Solution / S. V. Oskin, **N. U. Kurchenko**, G. A. Sultanov // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Russky Island, 04–06 марта 2019 года. Vol. 272, 2. – Russky Island : Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 022163.

*Свидетельства о государственной регистрации
интеллектуальной собственности:*

21. Патент № 2789929 С1 Российская Федерация, МПК В64D 1/18, В64С 27/08, В64С 39/02. Беспилотный летающий опрыскиватель : № 2022125755 : заявл. 29.09.2022 : опубл. 14.02.2023 / **Курченко Н. Ю.** ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 8 с.

22. Патент № 2793489 С1 Российская Федерация, МПК В64D 1/18, В64С 27/08, В64С 39/02. Многофункциональная беспилотная летающая система для опрыскивания растений в труднодоступных местах : № 2022127384 : заявл. 19.10.2022 : опубл. 04.04.2023 / **Курченко Н. Ю.** ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 10 с.

23. Патент № 2775478 С1 Российская Федерация, МПК Н02К 17/14. Асинхронный генератор с переключаемой обмоткой статора по схеме треугольник–звезда в двойную звезду : № 2021123615 : заявл. 05.08.2021 : опубл. 01.07.2022 / Оськин С. В., Баракин Н. С., **Курченко Н. Ю.** [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 6 с.

24. Патент № 2688183 С1 Российская Федерация, МПК С25В 9/08, С25В 1/10. Устройство для электролиза водных растворов : № 2018112058 : заявл. 03.04.2018 : опубл. 21.05.2019 / Богатырев Н. И., Оськин С. В., **Курченко Н. Ю.** [и др.] ; заявитель

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 12 с.

25. Патент № 2634277 С Российская Федерация, МПК А01М 21/00. Способ борьбы с сорной растительностью : № 2016148776 : заявл. 12.12.2016 : опубл. 24.10.2017 / Оськин С. В., Цокур Д. С., **Курченко Н. Ю.** ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 7 с.

26. Патент № 2777466 С1 Российская Федерация, МПК А01Р 13/00, А01N 33/08, А01N 37/18. Способ борьбы с сорной растительностью при выращивании бобовых культур : № 2021133217 : заявл. 15.11.2021 : опубл. 04.08.2022 / **Курченко Н. Ю.**, Оськин С. В., Цокур Д. С. [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 8 с.

27. Патент № 2643839 С1 Российская Федерация, МПК А01С 7/00, А01С 1/00. Способ посева овощных культур : № 2017112575 : заявл. 12.04.2017 : опубл. 06.02.2018 / Труфляк Е. В., Метлев И. В., Скоробогаченко И. С., **Курченко Н. Ю.** ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 5 с.

28. Патент № 2644472 С1 Российская Федерация, МПК С02F 1/461. Проточный электроактиватор воды : № 2016148774 : заявл. 12.12.2016 : опубл. 12.02.2018 / Оськин С. В., Цокур Д. С., **Курченко Н. Ю.** ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 10 с.

29. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2026618419. Программа для подсчета количества растений пропашных культур по данным, полученным с БАС (кормовых, крупяных, зернобобовых, овощных, бахчевых культур, подсолнечника, кукурузы, сахарной свеклы, картофеля, табака и других культур) :

№ 2026618410 : дата регистрации 25.03.2026 : заявка № 2026616694 от 14.03.2026 / **Курченко Н. Ю.**, Эвиев В. А., Буханцов К. Н. [и др.] ; правообладатель ФГБОУ ВО «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова». – 12 с.

В других изданиях, сборниках научных трудов и материалах конференции:

30. Курченко, Н. Ю. Методы и средства повышения эффективности эксплуатации беспилотных авиационных систем (БАС) для мониторинга объектов энергетической инфраструктуры / **Н. Ю. Курченко**, С. В. Оськин // Энергосистемы будущего : материалы Междунар. молодеж. энергет. форума, Москва, 17–19 дек. 2025 г. – Москва : Центр полиграфических услуг РАДУГА, 2026. – С. 270–274.

31. Тюпаков, К. Э. Состояние и перспективы развития овощеводства закрытого грунта / К. Э. Тюпаков, **Н. Ю. Курченко**, Е. Ю. Любимцева // Вестник экономики и права. – 2026. – № 117. – С. 70–78.

32. Курченко, Н. Ю. Экономическая эффективность автоматизированного подсчета растений подсолнечника с применением компьютерного зрения / **Н. Ю. Курченко**, М. К. Тюпаков, Е. Ю. Любимцева // Управление инновационным развитием агропродовольственных систем на национальном и региональном уровнях : материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. в рамках Десятилетия науки и технологий в РФ, Воронеж, 15–16 окт. 2025 г. – Воронеж : Воронежский ГАУ им. императора Петра I, 2025. – С. 110–112.

33. Любимцева, Е. Ю. Особенности применения электростатических форсунок на БАС в АПК / Е. Ю. Любимцева, **Н. Ю. Курченко**, К. Н. Буханцов // Проблемы и перспективы развития современных технологий в области конструкций, технического сервиса и эксплуатации наземных транспортных и транспортно-технологических средств и комплексов : материалы Всеросс. науч.-практ. конф. студентов и молодых исследователей, Зерноград, 26–27 марта 2025 г. – Зерноград : Донской ГАУ, 2025. – С. 117–119.

34. Назаренко, Л. В. Применение беспилотной технологии внесения пестицидов при возделывании высокостебельных сельскохозяйственных культур на примере кукурузы / Л. В. Назаренко, Т. В. Логойда, **Н. Ю. Курченко** // Защита растений от вредных организмов : сб. ст. по материалам XII Междунар. науч.-практ. конф., Краснодар, 16–20 июня 2025 г. – Краснодар : КубГАУ, 2025. – С. 293–295.

35. Курченко, Н. Ю. Критерии и факторы для внедрения БАС в АПК / **Н. Ю. Курченко** // Сб. ст. по материалам ежегод. науч.-практ. конф. преподавателей по итогам НИР за 2024 год : сб. тр. конф., Краснодар, 05 февр. 2025 г. – Краснодар : КубГАУ, 2025. – С. 830–831.

36. Сравнительные испытания дифференцированного внесения удобрений под озимую пшеницу с использованием карт-заданий и азотных сканеров / М. Даду, Е. В. Труфляк, **Н. Ю. Курченко**, В. Е. Курьян // Активная честолобивая интеллектуальная молодежь сельскому хозяйству. – 2022. – № 1(12). – С. 5–14.

37. Тюпаков, М. К. Методы оценки экономической эффективности внедрения электротехнологий в АПК / М. К. Тюпаков, Е. Ю. Любимцева, **Н. Ю. Курченко** // Проблемы и перспективы развития современных технологий в области конструкций, технического сервиса и эксплуатации наземных транспортных и транспортно-технологических средств и комплексов : материалы Всеросс. науч.-практ. конф. студентов и молодых исследователей, Зерноград, 26–27 марта 2025 г. – Зерноград : Донской ГАУ, 2025. – С. 115–117.

38. Гладких, К. А. Улучшение качества рабочего раствора пестицидов с применением электроактивированной воды при опрыскивании беспилотным летательным аппаратом / К. А. Гладких, Е. Ю. Любимцева, **Н. Ю. Курченко** // Современные проблемы и направления развития конструкций, technical сервиса и эксплуатации наземных транспортных и транспортно-технологических средств и комплексов : материалы Всеросс. (с междунар. участием) науч.-практ. конф. студентов и молодых исследователей, Зерноград, 28–31 марта 2023 г. – Зерноград : [б. и.], 2023. – С. 420–424.

39. Оськин, С. В. Требования к оборудованию и системам управления БПЛА с системой опрыскивания применяемых в АПК / С. В. Оськин, **Н. Ю. Курченко**, В. А. Дидыч // Итоги научно-исследовательской работы за 2021 год : материалы Юбилейн. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию Кубанского ГАУ, Краснодар, 06 апр. 2022 г. / отв. за вып. А. Г. Кощев. – Краснодар : КубГАУ, 2022. – С. 684–686.

40. Реализация технологии беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Е. В. Труфляк, **Н. Ю. Курченко**,

С. А. Макаренко, В. Е. Курьян // Научный вестник Луганского государственного аграрного университета. – 2021. – № 2(11). – С. 373–378.

41. Анализ возможности применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве как составной части обеспечения безопасности в растениеводстве / С. В. Оськин, **Н. Ю. Курченко**, Ле Тхи Тхюи Линь, А. Г. Болотин // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2018. – № 2(34). – С. 141–145.

42. Инновационные электротехнологии и электрооборудование в АПК / С. В. Оськин, Д. С. Цокур, С. А. Николаенко, **Н. Ю. Курченко** [и др.] // Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона : материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., Ставрополь, 25–26 мая 2018 г. – Ставрополь : Ставропольский ГАУ, 2018. – Т. 3. – С. 74–79.

43. Курченко, Н. Ю. Сравнительный анализ капитальных вложений при традиционном опрыскивании и применении беспилотной авиации при обработке против насекомых / **Н. Ю. Курченко** // British Journal of Innovation in Science and Technology. – 2018. – Т. 3, № 1. – С. 25–30.

44. Курченко, Н. Ю. Технология применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / **Н. Ю. Курченко** // British Journal of Innovation in Science and Technology. – 2018. – Т. 3, № 3. – С. 37–42.

45. Курченко, Н. Ю. Метод дистанционного определение густоты стояния подсолнечника / **Н. Ю. Курченко** // British Journal of Innovation in Science and Technology. – 2018. – Т. 3, № 5. – С. 33–40.

46. Труфляк, Е. В. Продовольственная безопасность в области точного сельского хозяйства, анализ отрасли / Е. В. Труфляк, **Н. Ю. Курченко** // Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность. – 2017. – № 2(30). – С. 106–114.

47. Труфляк, Е. В. Точное сельское хозяйство: вчера, сегодня, завтра / Е. В. Труфляк, А. С. Креймер, **Н. Ю. Курченко** // British Journal of Innovation in Science and Technology. – 2017. – Т. 2, № 4. – С. 15–26.

48. Труфляк, Е. В. Современное состояние точного сельского хозяйства / Е. В. Труфляк, **Н. Ю. Курченко** // Труды Кубанского

государственного аграрного университета. – 2017. – № 69. – С. 372–376.

49. Труфляк, Е. В. Точное сельское хозяйство: состояние и перспективы / Е. В. Труфляк, **Н. Ю. Курченко** // Физико-технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе : сб. науч. ст. по материалам Междунар. науч.-практ. конф., Ставрополь, 19–20 мая 2017 г. – Ставрополь : Секвойя, 2017. – С. 288–291.

50. Оськин, С. В. Повышение урожайности путем применения электроактивированной воды на стадии предпосевной обработки / С. В. Оськин, **Н. Ю. Курченко**, М. И. Кустов // Проблемы развития АПК региона. – 2016. – Т. 25, № 1-1(25). – С. 59–62.

51. Оськин, С. В. Математическая модель электроактиваторной установки для приготовления рабочих растворов гербицидов / С. В. Оськин, **Н. Ю. Курченко** // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2015. – Т. 3, № 7-2(18-2). – С. 320–323.

Подписано в печать «___» октября 2026 г. Формат 60 × 84 ¹/₁₆.

Бум. тип. № 1. Усл. печ. л. 2,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 013.

Отпечатано в ООО «Крон».

350051, г. Краснодар, ул. Дальняя, 39/3