Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина»

На правах рукописи



КУРЧЕНКО Николай Юрьевич

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

Специальность 4.3.2. «Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса»

Диссертация
на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук, профессор
Оськин Сергей Владимирович

Краснодар 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 5

1. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАС В ЦИФРОВОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ .. 15

1.1 Анализ состояния цифрового земледелия в АПК Российской Федерации 15

1.2 Анализ технологических операций с применением БАС в цифровом земледелии 24

1.3 Классификация БАС, энергетическая схема БАС и соответствующее программное обеспечение 45

1.4 Анализ существующих методов оценки эффективности эксплуатации БАС в цифровом земледелии 54

1.5 Выводы по главе, цель и задачи исследования 61

2. МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАС в АПК 64

2.1 Разработка комплексной системы критериев оценки эффективности эксплуатации БАС 64

2.2 Обоснование методологии повышения эксплуатационной эффективности БАС 89

2.3 Математическое компьютерное моделирование деятельного и приземного слоев при проведении работ с БАС 103

2.4 Математическое компьютерное моделирование гидродинамических и аэродинамических процессов при обработке технологическими растворами с помощью БАС 119

2.5 Описание электротехнологических процессов повышения качества обработок с применением БАС 138

2.6 Математические модели мониторинга сельскохозяйственных объектов для составления полетного задания в зависимости от данных аэрофотосъемки, потока ветра, агротехнологических характеристик и технических характеристик БАС. 150

2.7 Результаты использования методов повышения эксплуатационной эффективности БАС при выполнении технологических операций 175

2.8 Выводы по главе..... 184

3. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БАС В ЦИФРОВОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ 188

3.1 Алгоритм и описание программного обеспечения для обработки изображений и построения ортофотоплана 188

3.2 Алгоритм работы и программное обеспечение по сегментации областей изображений и распознавания для оценки качества всходов..... 196

3.3 Программное обеспечение методологического справочника и инженерного калькулятора расчета полетного задания для БАС в различных технологических операциях 212

3.4 Многофункциональное средство для опрыскивания растений..... 224

3.5 Внедрение результатов исследования в образовательную деятельность в соответствии с национальными проектами..... 235

3.6 Выводы по главе..... 238

4. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ 241

4.1 Результаты внедрения технологии мониторинга озимой пшеницы с помощью БАС 241

4.2 Сравнительные испытания дифференцированного внесения удобрений под озимую пшеницу с использованием карт-заданий 248

4.3 Сравнительный анализ дифференцированного внесения удобрений с использованием индекса NDVI и Биоиндекса 259

4.4 Результаты опытных исследований параметров опрыскивания с БАС 267

4.5 Использование БАС для гербицидной обработки пшеницы и внесения аммиачной селитры..... 277

4.6 Использование беспилотной технологии внесения удобрений, гербицидной, инсектицидной и фунгицидной обработок при возделывании озимого ячменя .. 281

4.7 Результаты внедрения технологии опрыскивания с электроактивированной водой для приготовления рабочего раствора пестицидов 285

4.8 Исследования возможности применения БАС в основных операциях при возделывании риса 293

4.9 Выводы по главе..... 298

5. ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ВНЕДРЕНИЯ БАС В РАСТЕНИЕВОДСТВО 300

5.1 Оценка повышения эффективности эксплуатации БАС на типовых модельных предприятиях 300

5.2 Оценка повышения эффективности эксплуатации БАС на примере опытной станции Кубанского ГАУ 309

5.3 Выводы по главе..... 314

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 316

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... 323

ПРИЛОЖЕНИЯ..... 355

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

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 [179, 218].

В этих условиях ключевым вектором устойчивого развития АПК становится его глубокая цифровая трансформация. Её 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 [109,157].

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 [91, 156, 220].

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 [101, 178].

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 [161, 201].

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 НИОКТР, 122031400635-3 НИОКТР), 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 исследования.

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 высыпают 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 ученных 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.

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 мощность 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.

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.

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 получить 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 исследований.

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 мощность 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.

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.).

Публикация результатов исследований.

Основные положения диссертации опубликованы в 52 печатных изданиях, в том числе в 3 статьях в международных базах данных Scopus и Web of Science, 17 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 2 монографиях, 9 патентах на изобретения, способах и программы для ЭВМ.

Структура и объем диссертации.

Диссертация изложена на 412 страницах, состоит из введения, основной части, содержащей 135 рисунков, 85 таблиц, заключения, списка литературы (включает 228 наименований, в том числе 20 – на иностранном языке), 45 приложений.

1. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАС В ЦИФРОВОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

1.1 Анализ состояния цифрового земледелия в АПК Российской Федерации

Анализ мировых тенденций развития аграрного производства и инновационных решений в смежных областях свидетельствует, что большая часть разработок в АПК в последние годы базируется на широком применении информационных, телекоммуникационных и электронных технологий, автоматизированных систем, роботов и др. Фактически на предприятиях создаются автоматизированные системы управления производством, постепенно вытесняющие человека из процессов сбора данных, принятия и реализации решений. Новые подходы требуют оптимизации расходов, соответствующего высокотехнологичного сельскохозяйственного оборудования, квалификации персонала и времени. Соответственно, при вложении стольких усилий, сельхозтоваропроизводители ожидают максимальный результат. Именно на этой основе возникло понятие «цифровое сельское хозяйство», в зарубежных странах наиболее часто используют термин «precision agriculture» – «точное сельское хозяйство» и «precision farming» – «точное земледелие». Основой цифрового сельского хозяйства являются модели сквозных процессов производства и сбыта сельскохозяйственной продукции, позволяющие оптимизировать производство и сбыт продукции в режиме, близком к автоматическому, при минимизации воздействия на окружающую среду [4, 5, 143, 180].

Сегодня под цифровым земледелием следует понимать сельское хозяйство, основанное на применении развитых технологий точного земледелия и животноводства с использованием интернета вещей, искусственного интеллекта, роботов, больших данных и других информационных и вычислительно-аналитических технологий, через которые будет организован непрерывный обмен оперативной информацией об операционных процессах с целью выработки общих и частных рекомендаций производственного, экономического, финансового и маркетингового характера для сельскохозяйственных

товаропроизводителей [24, 157, 175].

Согласно указу Президента РФ «О стратегии научно-технологического развития РФ» от 1 декабря 2016 года №642 одним из приоритетов развития страны следует считать переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям и роботизированным системам.

На рисунке 1.1 представлена схема этапов цифровой трансформации отечественного сельского хозяйства, включающая завершение перехода товаропроизводителей на развитые технологии точного земледелия и животноводства, организацию подготовки высококвалифицированных специалистов в области сельского хозяйства, агроинженерии, экономики и менеджмента для работы с цифровыми технологиями, создание цифровой инфраструктуры, обеспечивающей формирование и накопление больших данных, их систематизацию, анализ, выработку рекомендаций и готовых решений с использованием систем искусственного интеллекта и машинного обучения и доведение полученных результатов до конечных пользователей, а также увеличение в стране числа комплексных цифровых агрорешений, таких как «умная ферма», «умное поле» и «умная теплица» [181].

В настоящее время широкое распространение получил термин «сельское хозяйство 4.0», который предполагает завершение освоения системы точного сельского хозяйства с использованием спутниковой навигации, картирования полей, датчиков и другого навесного оборудования и применение на их основе цифровых технологий, обеспечивающих формирование общего цифрового пространства сельского хозяйства в масштабах региона и страны в целом [1, 15].



Рисунок 1.1 - Схема этапов цифровой трансформации сельского хозяйства России

В России реализуется государственная программа «Цифровая экономика РФ», которая выделяет следующие уровни цифровизации: (1) рынки и отрасли; (2) цифровые платформы; (3) технологии обеспечивающую инфраструктуру.

Минсельхозом России разработан ведомственный проект «Цифровое сельское хозяйство», предполагающий создание национальной платформы цифрового государственного управления сельским хозяйством, модуля «Агрорешения», предназначенного для повышения эффективности производства сельскохозяйственной продукции, и отраслевой электронной образовательной среды «Земля знаний» В настоящее время уже функционируют Центральная информационно-аналитическая система сельского хозяйства (ЦИАС СХ) и Единая федеральная информационная система земель сельскохозяйственного назначения (ЕФИС ЗСН) [176].

Потенциал цифровой экономики в АПК России по данным Аналитического центра Минсельхоза России представлен на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 - Структура затрат до и после внедрения цифровой экономики

Средняя себестоимость производства зерновых культур составляет в среднем 6579,5 руб./т, а после внедрения цифровой экономики – 5066,2 руб./т (экономия около 30 %) [182]. Схема структурно-функциональной модели системы цифрового земледелия России представлена на рисунке 1.3.

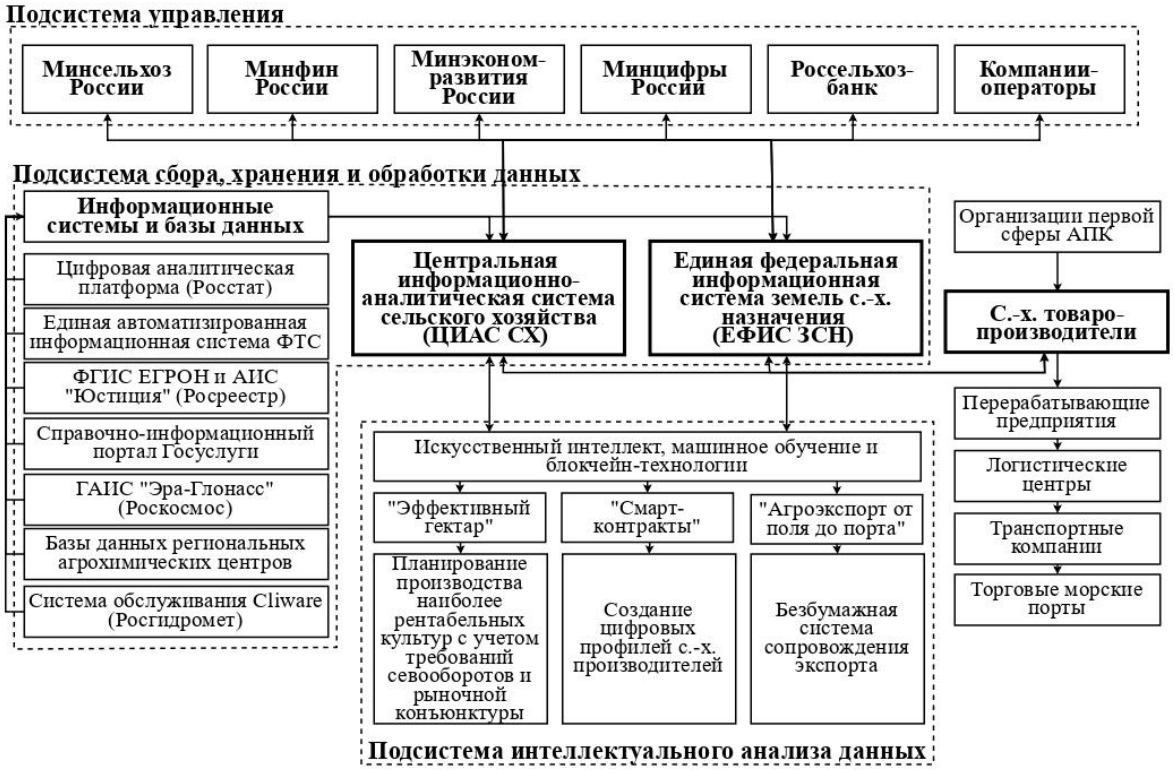


Рисунок 1.3 - Структурно-функциональная модель системы цифрового земледелия России

Важным источником наполнения рассматриваемых систем данными является информация, оперативно предоставляемая сельскохозяйственными товаропроизводителями обо всех операционных процессах в растениеводстве, что должно быть обеспечено широким использованием технологий точного земледелия и интернета вещей. Схема интеграции сельскохозяйственных товаропроизводителей в цифровую платформу АПК представлена на рисунке 1.4. Формирование единого информационного пространства цифровой платформы земледелия путем интеграции федеральных и региональных баз данных с алгоритмами искусственного интеллекта и машинного обучения позволит внедрять механизмы интеллектуального планирования производства и реализации сельскохозяйственной продукции с учетом природно-климатических, организационно-экономических и логистических условий конкретного региона. Дорожная карта научно-технологического развития точного земледелия в России до 2030 г. представлена на рисунке 1.5.

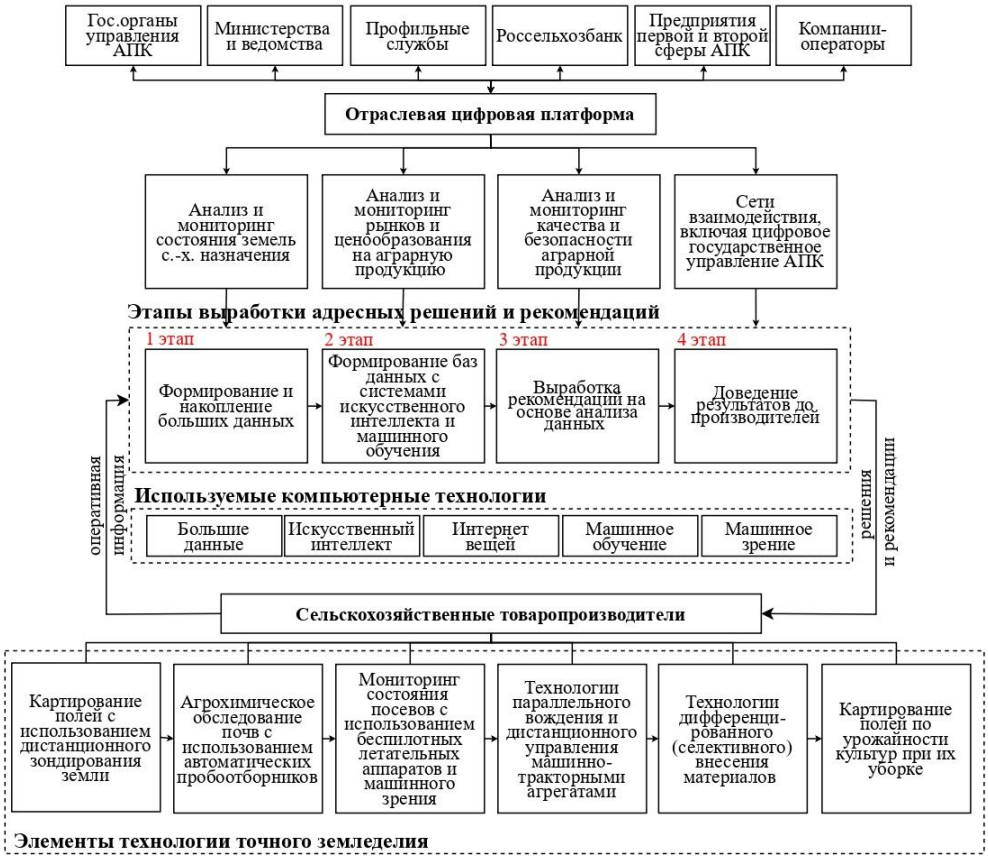


Рисунок 1.4 - Схема интеграции сельскохозяйственных товаропроизводителей в цифровую платформу АПК

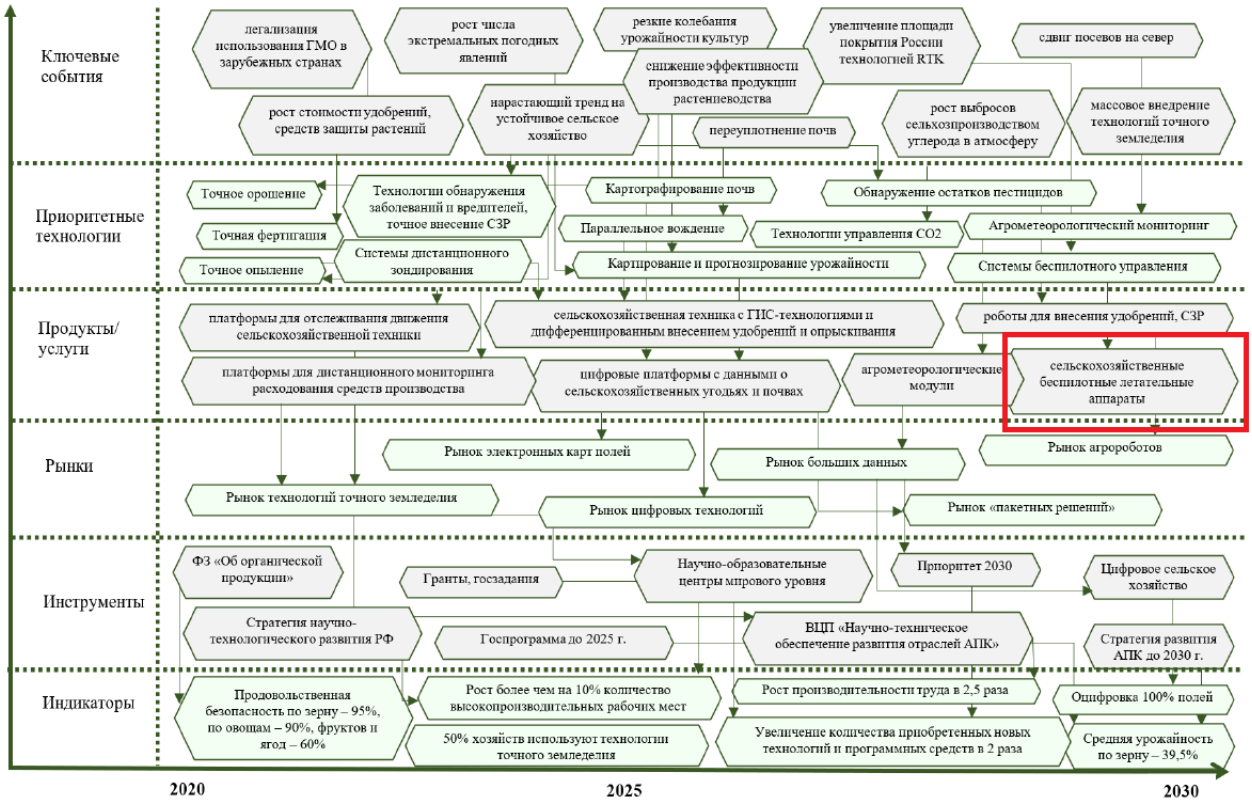


Рисунок 1.5 - Дорожная карта научно-технологического развития точного земледелия в России до 2030 г.

К элементам цифрового растениеводства, которые в настоящее время находят широкое практическое применение и будут использоваться в будущем, можно отнести: определение границ поля, дистанционное зондирование, системы параллельного вождения машин, локальный отбор проб почвы в системе координат, составление цифровых карт и планирование урожайности, дифференцированные технологии (посев, внесение удобрений, средств защиты растений, регуляторов роста), мониторинг качества состояния почвы и растений (рисунок 1.6) [56, 107]. К рынку технологий точного земледелия можно отнести и сельскохозяйственных роботов (беспилотные транспортные средства и летательные аппараты), автоматизированные системы контроля вегетации сельхозкультур (датчики для измерения свойств почвы, растений и погодных фактов) и технологии Big Data [19, 50, 65]. Объединяющим фактором этих направлений является возможность применения БАС в качестве основного

инструмента. Согласно проведенному анализу одним из передовых направлений в развитии цифрового земледелия в мире станет применение БАС, и Российская Федерация не является исключением [152, 202].

В Федеральном законе от 03.07.2016 г. № 291-ФЗ «О внесении изменений в Воздушный кодекс Российской Федерации» вводится термин «Беспилотная авиационная система» (БАС) - комплекс взаимосвязанных элементов, включающий в себя одно или несколько беспилотных воздушных судов, средства обеспечения взлета и посадки, средства управления полетом одного или нескольких беспилотных воздушных судов и контроля за полетом одного или нескольких беспилотных воздушных судов [83].

БАС, помимо самого летательного аппарата, состоит из бортового комплекса управления, полезной нагрузки и наземной станции управления. Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) в общем случае - это летательный аппарат без экипажа на борту.



Рисунок 1.6 - График распределения публикаций в области точное земледелие в БД Web of Science

Анализ мировой патентной активности отражает рост интереса стран в области БАС, так, например, с 2011 года по 2019 год количество патентов выросло с 70 до 2629 (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 - Диаграмма количества патентов в период 2011-2025 гг

Также стоит отметить, что за этот период произошла популяризация БАС в разных отраслях: археологии, строительстве, геодезии, геологии, сельском хозяйстве и спорте. За этот период промышленностью выпущено большое количество моделей различной конфигурации. Спрос на БАС вызван интенсивным развитием в области материаловедения, оптики, аккумуляторных батарей (АКБ), электроники, программного обеспечения (ПО) и интеграции этих технологий в беспилотную авиацию [68, 75, 144, 183].

В нашей стране уже сформирована законодательная база по внедрению БАС в единое воздушное пространство страны. Соответствующие поручения утверждены 27 апреля 2023 года в рамках программы «Развития беспилотных авиационных систем». Они касаются обеспечения безопасности систем обслуживания воздушного движения, цифровой организации воздушного трафика и борьбы с противоправным применением БАС. Создан единый реестр отечественных производителей беспилотных воздушных судов (БВС). Правила формирования и ведения единого реестра опубликованы Минпромторгом 20 ноября 2023 года, а юридической силой соответствующее постановление обладает с 1 января 2024 года. Правила запуска и разрешенные зоны полетов БАС определены Министерством транспорта Российской Федерации и вступили в силу с 1 марта 2024 года. В июле 2023 года мэр Москвы Сергей Собянин сообщил, что подписаны

соглашения с 11 регионами страны о развитии беспилотной авиации и строительстве научно-практических центров. Также он отметил, что производство БАС в Москве увеличилось более чем в 4 раза, а в рамках общей стратегии развития области беспилотной авиации научные и производственные центры будут строиться на всей территории России. Утверждена программа создания 8 крупных центров производства БАС. В Самарской области в апреле 2024 года начато строительство завода для выпуска грузовых БАС, в городах Самара и Тольятти оборудуются специальные полигоны для летных испытаний гражданских БАС, в конце августа 2025 года начал функционировать НПЦ полного цикла по производству гражданских беспилотных авиасистем. В Ненецком автономном округе в первом квартале 2025 года создана инфраструктура для оказания логистических услуг при помощи беспилотных авиационных систем. В республике Татарстан при участии колледжа «Алабуга Политех» в июле 2025 года открыт крупный центр подготовки специалистов по производству и программированию БАС. В Уральском федеральном округе в третьем квартале 2025 года начато строительство производственно-научного центра испытаний в сфере развития авиационных беспилотных систем. Курирует проект холдинг «Росэлектроника» под управлением корпорации Ростех. В Свердловской области готовится к вводу в эксплуатацию завод по производству БАС в сотрудничестве с НПК «Энергетические системы и компоненты». В Рязанской области на базе аэропорта «Протасово» в августе создали научно-производственный центр для разработки и последующего выпуска БАС. Кроме того, промышленные мощности для изготовления БАС в России могут разместить и китайские производители. В начале 2023 года информацию о таком решении озвучили компании AEE, ZeroZero и Fimi, они намерены выпускать легкие гражданские суда.

При поддержке Минобрнауки РФ начала функционировать программа развития инновационных компонентов для БАС. Фонд Национальной технологической инициативы (НТИ) курирует программу «Разработка и выпуск коммерческих БВС». В рамках программы развития будет выделено около 30 млрд. руб. до 2030 года. С 1 января 2025 года запущен национальный проект

«Беспилотные авиационные системы», который определяет стратегию развития беспилотной авиации на период до 2030–2035 гг. На его реализацию предусмотрено федеральное финансирование в размере 696 млрд рублей. За этот период в стране должна появиться перспективная самостоятельная отрасль экономики, связанная с созданием и использованием гражданских БАС. Структура нацпроекта включает пять федеральных проектов: «Стимулирование спроса на отечественные БАС», «Разработка, стандартизация и серийное производство БАС и комплектующих», «Развитие инфраструктуры, обеспечение безопасности и формирование специализированной системы сертификации БАС», «Кадры для беспилотных авиационных систем», «Фундаментальные и перспективные исследования в сфере БАС». Федеральные проекты предусматривают разработку и серийное производство отечественных БАС, создание крупных производственных центров, развитие инфраструктуры, включающее строительство аэродромов, вертодромов и дронопортов, а также подготовку кадров для беспилотной авиации [7].

1.2 Анализ технологических операций с применением БАС в цифровом земледелии

Применение беспилотных летательных аппаратов является высокоэффективным инструментом для агропромышленного комплекса, начиная с самого раннего этапа сезонных полевых работ - предпосевной кампании. Особую ценность технологии приобретают для сельхозпроизводителей, которые впервые осваивают новые земельные участки и не имеют доступа к истории их использования. Визуальный осмотр в таком случае дает лишь общее представление, тогда как детальная и точная информация, получаемая с помощью БАС, позволяет значительно повысить качество управленческих решений и общую эффективность работы предприятия [20, 26, 41, 152].

Этап всходов важен в процессе выращивания культур. На этом этапе анализируется уровень потерь, определяется потребность в подсеве или пересеве, прогнозируется урожайность и логистика. Использование БАС позволяет выявлять проблемы наиболее оперативно. Главная информация, которую получает агроном – карты густоты посевов и зоны неоднородности всходов, происходит сравнение всех полей предприятия и подсчет общих потерь всходов [60, 88].

С помощью специализированного ПО для обработки изображений, по ортомозаичным планам с привязками к координатам местности (ортофотоплану), созданную по фото с БАС, появляется возможность точной оценки качества всходов и измерения их густоты (рисунок 1.8). На основании полученной информации можно принимать решение о пересеве, либо прореживании культур в конкретных местах [123]. Так же появляется возможность прогнозирования урожайности, что немало важно в современных условиях сельскохозяйственного производства.

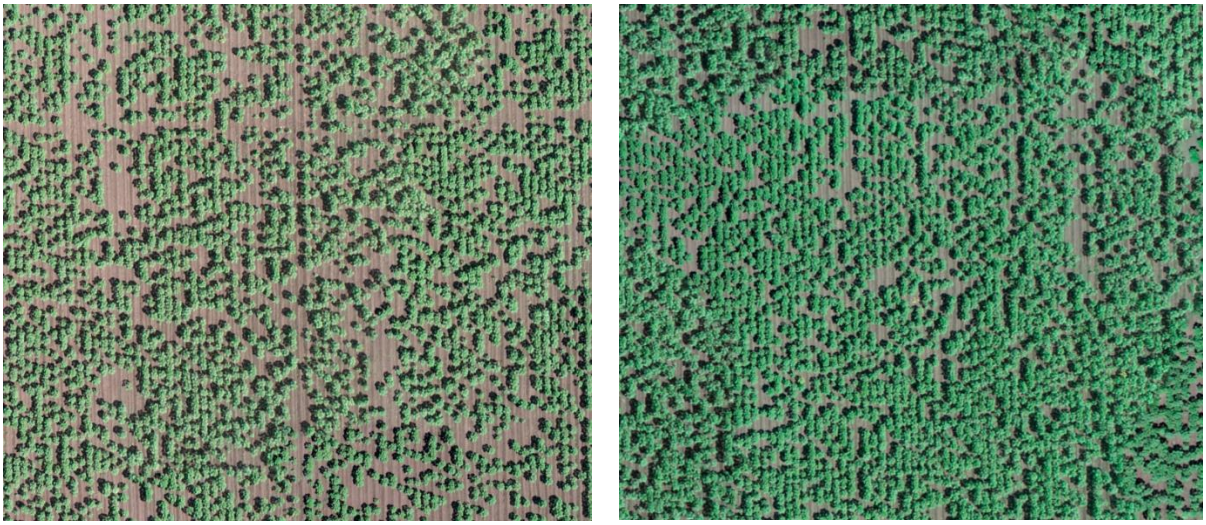


Рисунок 1.8 - Изображение внешнего вида участков поля с различной густотой подсолнечника в фазе 4-6 листьев

Данный подход позволяет увеличить количество контрольных площадок, или исследовать все поле. При интеграции технологий машинного зрения появляется возможность автоматизировать процесс на основе полученных данных. ПО для этих задач должно иметь возможность выбора вида культуры и автоматически

создавать размеры контрольных участков, распознавать тип и количество растений, рассчитывать плотность растений и прогнозировать урожайность по сортовым особенностям культуры.

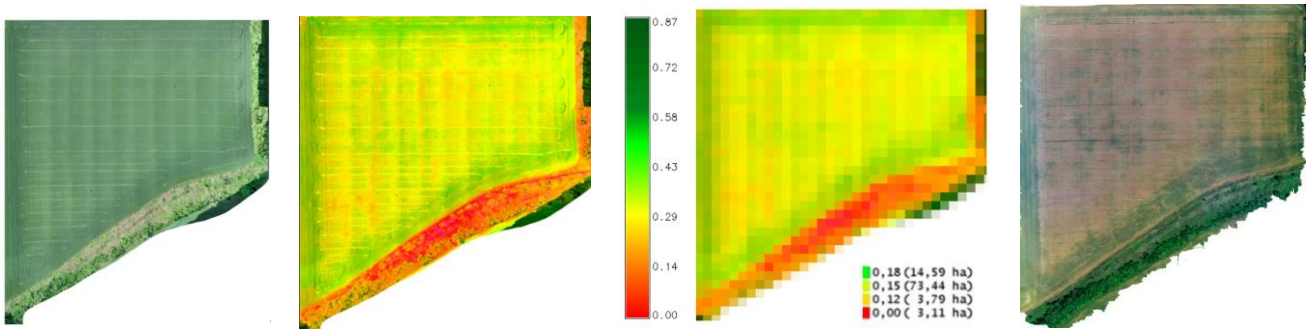
Технология мультисенсорной фотосъемки с дистанционным зондированием земли использует полосы зеленого, красного, синего и инфракрасного диапазонов для захвата видимых и невидимых изображений культур и иной растительности. Мультиспектральные изображения интегрируются со специализированным ПО, которое переводит информацию в цифровые данные. Данные наземной телеметрии, состояния почвы и урожая позволяют контролировать, планировать и управлять процессом более эффективно, экономя ресурсы, время и экономические затраты [31, 154]. Данные из мультиспектрального изображения позволяют определять виды и координаты появления вредителей, болезней и сорняков, что, в свою очередь, позволяет осуществлять адресное использование средств защиты растений, получать данные о плодородии почв и уточнять нехватку конкретных элементов питания для дифференцированного внесения удобрений и программирования урожайности возделываемых культур. Спектральная визуализация на основе отражающей способности позволяет извлекать дополнительную информацию - индексы растительности (таблица 1.1).

Таблица 1.1 - Индексы растительности применяемые в сельском хозяйстве

Индекс	Формула	Применение
NDVI	$\frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red)}$	Общий мониторинг растительности, оценка состояния растений
EVI	$G \cdot \frac{(NIR-Red)}{(NIR+C_1 \cdot Red-C_2 \cdot Blue+L)}$	Влажные регионы, густые леса, устойчивость к атмосферным помехам
NDRE	$\frac{(NIR-RedEdge)}{(NIR+RedEdge)}$	Оценка азотного дефицита, зрелые культуры (LAI > 3)
SAVI	$\frac{(NIR-Red)}{(NIR+Red+L)} \cdot (1+L)$	Редкая растительность, засушливые регионы
MSAVI	$\frac{2 \cdot NIR+1-\sqrt{(2 \cdot NIR+1)^2-8 \cdot (NIR-Re}}{2}$	Ранние стадии роста растений, пустынные экосистемы
GNDVI	$\frac{(NIR-Green)}{(NIR+Green)}$	Оценка содержания хлорофилла, азотного питания

NDWI	$\frac{(NIR-SWIR)}{(NIR+SWIR)}$	Мониторинг влажности растительности, водного стресса
VARI	$\frac{(Green-Red)}{(Green+Red-Blue)}$	Быстрая оценка зелени по RGB-данным (БАС, спутники без NIR)
PRI	$\frac{(Green-Blue)}{(Green+Blue)}$	Оценка фотосинтетической активности, стресса
CI	$\frac{NIR}{Green} - 1$	Анализ содержания хлорофилла
PSRI	$\frac{Red-Blue}{NIR}$	Определение старения листьев, окислительного стресса

Для различных растений в различных фазах развития могут быть применимы с большей эффективностью разные индексы и требования для их получения могут отличаться. На сегодняшний день одним из самых популярных инструментов по работе с минеральным питанием растений является нормализованный вегетационный индекс растительности (NDVI). Индекс NDVI является предпочтительным для глобального мониторинга растительности, поскольку он помогает компенсировать изменения условий освещения и других внешних факторов. На основе полученной информации строиться градация содержания азота в растениях (рисунок 1.9) [67, 122, 206].



а) б) в) г)

Рисунок 1.9 - Изображение исследуемого участока для дифферцированого внесения: а) - ортофотоплан участка; б) - мультиспектральное изображение (NDVI); в) - карта-задание для бортового терминала AMATRON+ с системой дифференцированного внесения удобрений off-line Insight; г) - мониторинг исследуемого участка перед уборкой

По соотношению показаний NDVI и количества азота составляется калибровочная таблица и вносится в бортовой компьютер техники. На основании

данной таблицы проводится внесение удобрений, то есть, двигаясь по полю, вносится удобрение с помощью разбрасывателя (рисунок 1.10а), контроль за внесением осуществляет бортовой компьютер разбрасывателя (рисунок 1.10б). В процессе подкормки нормы внесения изменяются по ходу движения трактора в разных точках поля [165, 174].



а) б)

Рисунок 1.10 - Изображение оборудования для дифференцированного внесения: а) - двухдисковый центробежный разбрасыватель удобрений ZA-M 1500; б) - бортовой компьютер AMATRON+ с системой дифференцированного внесения удобрений off-line Insight

Повторный мониторинг в конце вегетационного периода, непосредственно перед уборкой урожая, позволяет уточнить оптимальные сроки проведения работ и оценить равномерность созревания культур.

Для эффективного решения задач сельскохозяйственного мониторинга БАС должны оснащаться камерами, способными вести съемку в различных диапазонах электромагнитного спектра (видимом, ближнем инфракрасном, красном крае).

Ключевые требования к камерам включают высокое пространственное разрешение для детализации мелких объектов и раннего выявления проблемных зон, спектральные каналы, необходимые для расчета вегетационных индексов, или методики, позволяющие из RGB спектра выделить неоднородные зоны вегетации, которые объективно отражают состояние посевов, радиометрическая калибровка для обеспечения сопоставимости данных между разными периодами съемки. Для реализации технологии БАС оснащаются датчиком GPS, камерой, и системой

стабилизации [177]. Кроме мультиспектральных камер на борту БАС могут быть использованы гиперспектральные камеры и тепловизоры.

С помощью БАС с лидаром могут быть оперативно получены высоко детальные карты рельефа местности, на которых фиксируются перепады высот, элементы гидрографии (овраги, балки), а также естественные и искусственные объекты инженерной инфраструктуры (дороги, курганы, линии электропередач, дренажные системы и др.).

Обработка и анализ полученных данных требуют специализированного программного обеспечения (ПО), которое должно обеспечивать: построение ортофотопланов и цифровых моделей рельефа (ЦМР) и поверхности (ЦМП), автоматизированное создание карт вегетационных индексов, инструменты для зонирования территории по показателям продуктивности и состояния растений, функционал для отслеживания динамики изменений в течение сезона. Так же в случае стихийных условий агрономы могут документировать потери для страховых выплат.

Активное внедрение БАС в цифровое земледелие с целью мониторинга сталкивается с комплексной проблемой, требующей решения в области как аппаратной части, так и программного обеспечения. Существует разрыв между большими объемами сырых данных, собираемых аппаратурой на БПЛА, и их практической трансформацией в готовые агрономические решения. Для БАС необходима разработка и массовое внедрение недорогих, но надежных мультиспектральных камер, или методик позволяющих заменить мультиспектральные изображения RGB - снимками адаптированных к специфике сельскохозяйственной съемки (оптимальные наборы спектральных каналов, устойчивость к полевым условиям).

Для организации защиты растений от вредных организмов важное место занимает своевременный и точный фитосанитарный мониторинг. Своевременное обнаружение и прогноз развития заболевания, вредных насекомых – неотъемлемая часть любых защитных мероприятий сельскохозяйственных культур. Важнейшая причина больших недоборов урожая сельскохозяйственных культур – листовые

болезни, распространяющиеся воздушно-капельным путём. Перспективным средством предупреждения распространения грибных болезней различных культур является мониторинг переносимых воздухом спор грибных фитопатогенов, который может обеспечить раннее выявление инфекционного начала и своевременное проведение защитных мероприятий. В Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный научный центр биологической защиты растений» (ФГБНУ ФНЦБЗР) на базе лаборатории фитосанитарного мониторинга агроэкосистем ведутся работы по совершенствованию методов фитосанитарного мониторинга на основе создания технических средств контроля фитопатогенной инфекции в воздухе и на поверхности растений. Портативный спороулавливатель используется совместно с БАС [141, 159].

Портативный спороулавливатель содержит корпус с размещенным в нем аспиратором и стеклодержателем с предметным стеклом, щелевой патрубок, установленный на откидывающейся крышке, и мотор-редуктор (рисунок 1.11). При этом мотор-редуктор дополнительно снабжен шестерней, а стеклодержатель выполнен с боковой стороны в виде прямозубой рейки и соединен с шестерней мотора-редуктора посредством зубчатой передачи и с блоком управления и GPS-модулем, размещенным с внешней стороны корпуса.

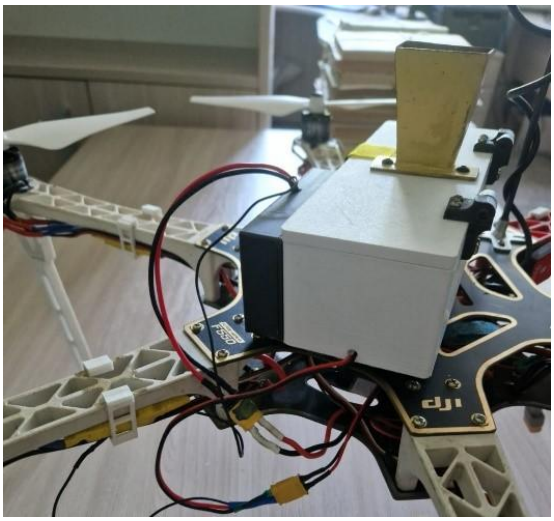


Рисунок 1.11 - Изображение пробоотборника воздуха

На зерновых культурах спороулавливающими устройствами эффективно отлавливаются споры возбудителей болезней: мучнистой росы (Blumeria graminis), бурой (листовой) ржавчины пшеницы (Puccinia triticina), жёлтой ржавчины пшеницы (Puccinia striiformis), жёлтой пятнистости листьев (Pyrenophora tritici-repentis).

Для ПО требуется создание интеллектуальных аналитических платформ,

которые не просто визуализируют данные, но и на основе алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта автоматически выявляют аномалии, прогнозируют урожайность, дифференцируют зоны и формируют конкретные рекомендации для агронома (например, карты-задания для дифференцированного внесения удобрений или средств защиты растений).

Из года в год в осенне-зимний период озимые культуры подвергаются нашествию мышевидных грызунов, что ставит под угрозу получение будущего урожая в запланированных объемах. Этому способствует хорошая кормовая база, особенно при затянувшейся уборке зерновых культур, подсолнечника, кукурузы, которая, как правило, сопровождается большими потерями урожая. Особое внимание борьбе с мышевидными грызунами необходимо уделять аграриям, которые применяют в своих хозяйствах технологию обработки почвы No-till. На таких полях наблюдается повышенная численность мышевидных грызунов, поскольку отсутствует обработка почвы. Применяя БАС можно обнаружить колонии грызунов и точечно проводить обработку (рисунок 1.12).

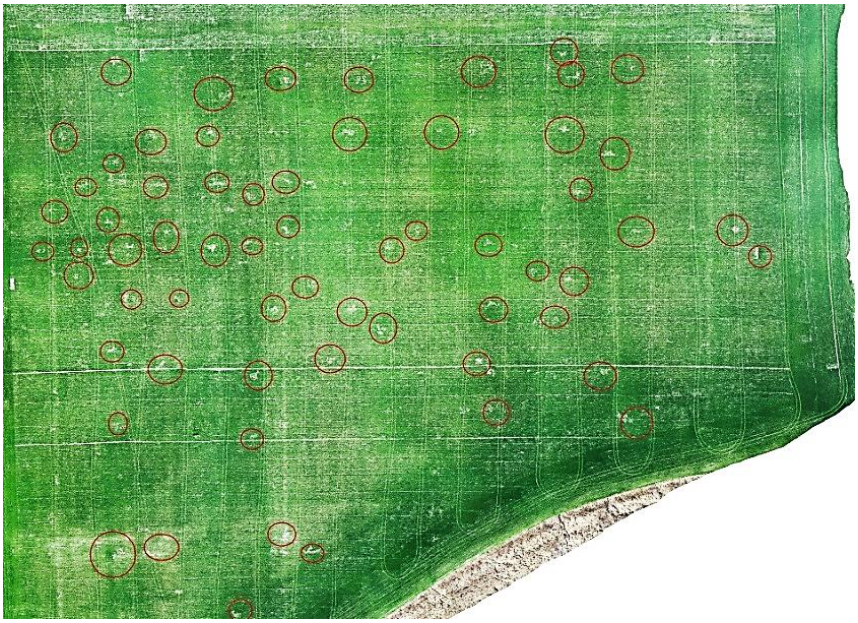


Рисунок 1.12 - Изображение ортофотоплана с разметкой колоний грызунов

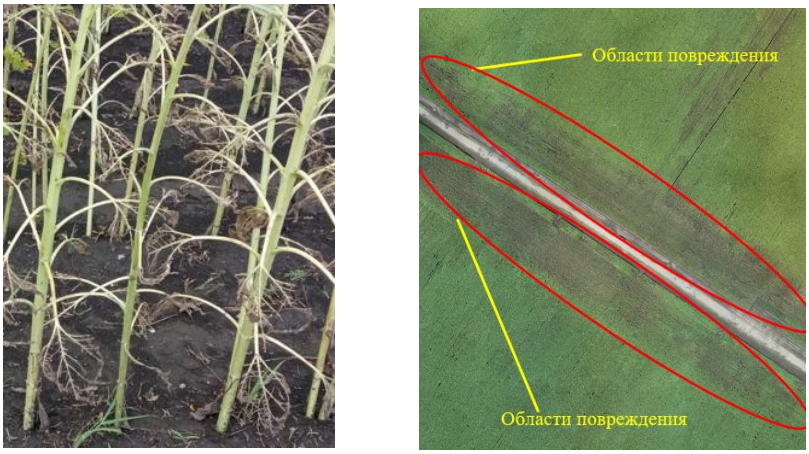
Возникает потребность в ПО, способном автоматически анализировать полученные данные, и выдавать рекомендации по обнаружению очагов поражения. Также требуется разработать методику и программный инструмент для автоматизированного подбора БАС, типа камеры и параметров съёмки в зависимости от культуры, типа угрозы (болезнь, вредитель, сорняк) и условий эксплуатации [89].

Очень важная и часто востребованная задача - оценить состояние растений на наличие вирусов, вредителей или сорной растительности. Зерновые культуры поражает большое количество бактериальных болезней, но они имеют разную вредоносность. Возбудители бактериальных болезней и вредители поражают семена и все органы растений в течение вегетации, вызывают частичную или полную их гибель. Внешне признаки заражения часто сопровождаются изменением цветового окраса колоса, листа или стебля (рисунок 1.13, 1.14). Исследуя растение с использованием видимого нижнего инфракрасного спектра частот в результате облета поля БАС, возможно идентифицировать растения и пораженные участки по цветовому признаку, создавать многослойные карты, отслеживающие изменения в растениях, принять меры по локальной или сплошной обработке.



а) б)

Рисунок 1.13 - Внешний вид пораженных растений: а) - ржавчина на пшенице; б) - заражние сои



а) б)

Рисунок 1.14 - Внешний вид зараженного участка подсолнечника: а) – пораженные листья подсолнечника; б) – пораженные участки

На этом этапе возможно, не допустив распространения болезни или вредителей применение БАС с рабочим органов в виде опрыскивателя для работы с очагом поражения. Внедрение БАС в процесс опрыскивания сельскохозяйственных культур открыло новые горизонты в области цифрового земледелия [147, 212]. Данная технология позволяет оперативно, локально и с высокой эффективностью вносить семенной материал, средства защиты растений и удобрения, особенно на труднодоступных, заболоченных или холмистых участках в период агротехнологического окна, осложненного погодными факторами. Перспективным направлением эффективного применения БАС для внесения СЗР являются поля, где установлены дождевальные машины. Сегодня нашли широкое использование круговые и фронтальные дождевальные машины, соответственно остаются участки полей угловые зоны, поля сложной формы, труднодоступные территории), куда крупногабаритная техника не может добраться, как правило это участки неправильной формы, площадью от 1 до 7 га [27, 63, 153]. Изображения фрагментов неудобий полей с поливными машинами показаны на рисунке 1.15.



Рисунок 1.15 - Изображения фрагментов неудобий полей с поливныеми машинами

Для достижения необходимого размера капель опрыскивании с БАС применяется два типа распылителей (рисунок 1.16): щелевые и вращающиеся (форсунки-атомайзеры) [33, 155]. Принципиальное отличие заключается в конструкции и принципе распыления рабочего раствора. В качестве щелевых

распылителей в большинстве случаев применяются плоскоструйные распылительные наконечники расширенного диапазона. Рабочее давление в диапазоне 1-4 бар, углы распыления 80° и 110°, производительность одной насадки 0,23-0,45 л/мин.



а) б)

Рисунок 1.16 - Внешний вид форсунок устанавливаемых на БАС: а) - щелевая форсунка; б) - фосунка атомайзер

Особенность щелевых форсунок заключается в том, что разделение потока жидкости на капли происходит после того, как жидкость прошла грань сопла. Размер капель находится в зависимости от давления насоса и обычно не однороден, при большем давлении образуется больше мелких и очень мелких капель. Обычно применяют форсунки с наконечниками типа «01» расход которых 0,39 л/мин при давлении насоса 3 атм. Со временем наблюдается износ материала форсунки, в связи с чем вариационный коэффициент может составлять 50-60%, по сравнению с новой 3-6%, при таком состоянии форсунки эффективность внесения СЗР резко снижается, поскольку вносится на 30–60 % меньше или больше, чем требуется, также не соблюдается равномерность внесения и как следствие появление огрехов или передозировка и токсическое действие на возделываемую культуру и последующую в севообороте. Рекомендованный уровень износа для замены 10 % (примерно 5 000 га). Выявлено, что серьезным недостатком использования гидравлических распылителей при уменьшении нормы расхода рабочих жидкостей (с БПЛА применяется ультромалообъемное опрыскивание (УМО), с нормой от 5 до

25 л/га) – возрастают требования к воде для приготовления рабочего раствора [43, 54, 217].

Разработкой опрыскивателей атомайзеров или центробежных форсунок с вращающимся распылителем занимались в период с 2001-2005 гг. ОАО «ВИСХОМ» (переименован ООО «НПФ ГУТА») совместно с ГНУ ВНИИФ и ВИЗР. Принцип действия этих форсунок отличается от щелевых, основное преимущество распылителей такого типа перед гидравлическими – регулирование в широком диапазоне требуемого качества распыления рабочих жидкостей в зависимости от уровня снижения нормы расхода (до 5 л/га) и отсутствие особых требований к воде и ее фильтрации [139, 142, 173]. Механическое распыление осуществляется с помощью механизмов, вращающихся от специального привода. Жидкость приобретает кинетическую энергию вследствие действия центробежных сил. Как и в случае гидравлического распыления, в зависимости от конструкции распыляющего механизма (диск, стакан, конус и др.), дроблению подвергается струя или пленка жидкости. Характер дробления жидкости в данном случае в значительной мере определяется её расходом. При очень малом расходе на кромке вращающегося диска возникает жидкий тор, который под действием центробежных сил деформируется и на нём образуются шаровидные узлы, затем они отрываются в виде отдельных капель. При увеличении расхода эти узлы вытягиваются в тонкие струи и нити. Число нитей увеличивается, достигая постоянной величины. При дальнейшем увеличении расхода нити не могут пропустить всю жидкость из тора, жидкость сбрасывается с кромки и образует пленку. Вначале эта пленка вытягивается на определенное расстояние от кромки, а далее распадается на нити и крупные капли.

К достоинствам этого способа следует отнести возможность распыления высоковязких и загрязненных жидкостей и широкого регулирования производительности распылителя без существенного изменения дисперсности. Основные недостатки вращающихся распылителей: высокая стоимость, сложность в изготовлении и эксплуатации, большая энергоемкость и, кроме этого, наличие

вентиляционного эффекта. Механическое распыление используют главным образом для дробления вязких жидкостей и суспензий.

Кроме разного типа форсунок стоит учитывать особенности применяемого насоса для подачи рабочего раствора к форсункам, определяющим качество опрыскивания и контроль давления в системе. На сегодняшний день на БПЛА применяется два типа насосов плунжерный и перистальтический (таблица 1.2). Плунжерный насос подходит для агрессивных химикатов (устойчив к коррозии), обеспечивает точную дозировку. Перистальтический насос, жидкость перекачивается за счет сжатия гибкого шланга роликами, позволяет осуществить минимальный контакт с химикатами (меньше износ). Достоинством является высокая точность дозировки и работа с препаратами различной вязкости [125].

Таблица 1.2 - Характеристики насосов систем опрыскивания БАС

Модель БАС	Насос тип (кол-во)	Форсунки (кол-во/тип)	Произв-ть (л/мин)	Давление (МПа)	Напряжение (В)	Ток (А)	Мощность (Вт)
Agras T10	Плунжерный (1)	4 (щелевые)	4-6	0,3-0,5	24	3-6	72-144
Agras T20	Плунжерный (1)	8 (щелевые)	4-6	0,3-0,5	24	3-6	72-144
Agras T30	Плунжерный (2)	16 (щелевые)	6-8 (×2)	0,5-0,7	24-48	5-10	120-480
Agras T40	Плунжерный (2)	2 (вращ)	6-12	0,5-0,8	48	8-12	384-576
Agras T50	Плунжерный (2)	2 (вращ)	8-15 (×2)	0,8-1,0	48	10-15	480-720
XAG V40	Перильст. (1)	8 (конусн.)	6-10	0,4-0,6	24	6-9	144-216
XAG P40	Перильст. (1)	4 (щелевые)	4-8	0,3-0,5	24	4-7	96-168

БАС с дополнительным оборудованием также может найти применение для побелки кровли и фасадов теплиц и животноводческих комплексов. Известковая смесь или специальная краска наносится тонким и равномерным слоем в летние месяцы, и легко смывается осенью, создавая экран для отражения и рассеивания солнечных лучей. Белый слой мела или специальной краски не позволяет инфракрасному (тепловому) спектру проникать внутрь, защищая растения от ожогов и перегрева без блокировки необходимого им дневного света, снижает

температуру внутри на 3–5°C. Это эффективный и бюджетный способ защитить растения и животных от палящего солнца и перегрева в жаркие летние месяцы. При этом известны машины для очистки и побелки крыш теплиц (рисунок 1.17), но БАС имеют большой потенциал для реализации, так как могут быть применимы при любой геометрии кровли и различных конструкционных материалах (пленка, поликарбонат) и разнородных теплиц любой площади, а также для средних стеклянных комбинатов.



а) б)

Рисунок 1.17 - Изображение побелки кровли и фасадов: а) - машина для очистки и побелки крыш; б) – БАС для нанесения раствора на кровлю и фасад

Применение БПЛА с различными видами разбрасывателей позволяет существенно расширить возможности в цифровом земледелии. Платформа для внесения сыпучих компонентов включает бак для материала емкостью от 1 до 60 литров, разбрасыватель тарельчатого типа, регулятор скорости вращения (рисунок 1.18). Характеристики системы разбрасывания приведены в таблице 1.3.

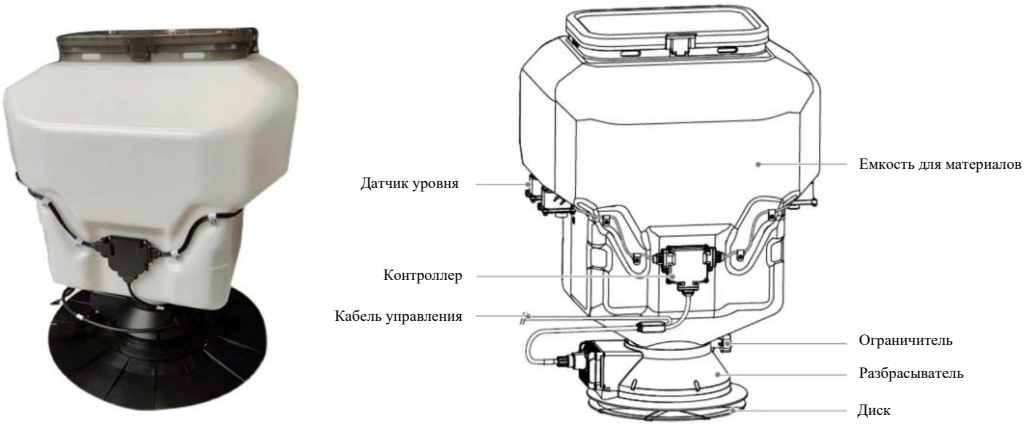


Рисунок 1.18 - Изображение внешнего вида системы разбрасывания

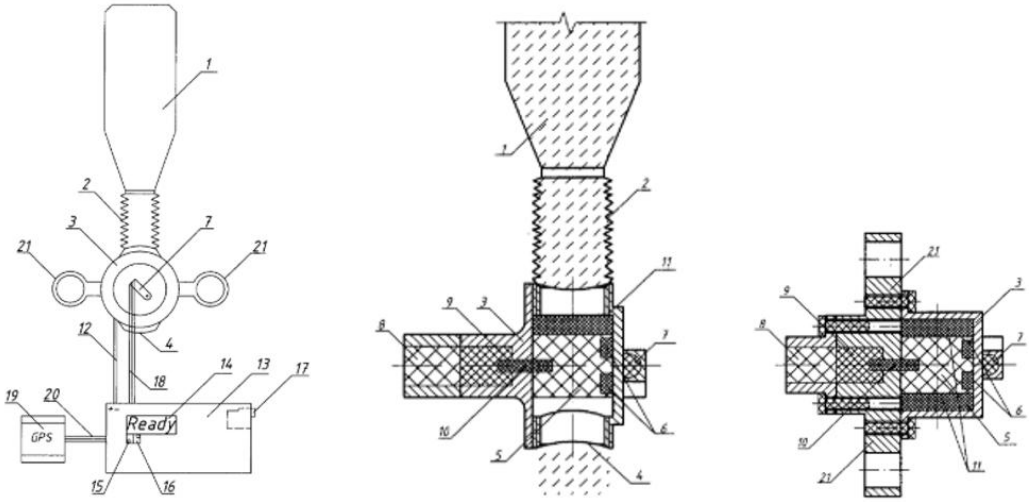
Таблица 1.3 - Характеритсики систмы разбрасывания для БАС компании DJI

Модель разбрасывателя	DJI (T10/T30/T40)	DJI (T20/T50)
Совместимые БАС	Agras T10, T30, T40	Agras T20, T50
Тип разбрасывания	Центробежный	Центробежный
Объем бункера (л)	15 (T10), 25 (T30/T40)	20 (T20), 30 (T50)
Ширина разбрасывания (м)	4–7	5–8
Скорость высева (кг/мин)	0,5–3	0,5–4
Рабочее напряжение	12–24 В	24 В
Потребляемая мощность	50–150 Вт	60–200 Вт
Точность распределения	±5%	±5%
Вес (пустой, кг)	2,5 (T10), 3,5 (T30/T40)	3,0 (T20), 4,0 (T50)
Материал корпуса	Пластик + металл	Пластик + металл

Ключевыми проблемами внедрения БАС для опрыскивания и разбрасывания являются отсутствие методики выбора оптимальной модели или расчета необходимого парка техники для предприятий различного размера. На текущий момент формирование парка БАС производится эмпирически, а не на технико-экономических расчетах. Это порождает ряд проблем связанных с несоответствием задач и возможностями аппарата, низкой загрузкой, неэффективностью инвестиций. Неопределенность в расчете структуры экипажа вызвана отсутствием четкого алгоритма для определения оптимального количества БАС, исходя из общей площади обрабатываемых земель и их конфигурации, требуемой частоты обработок (сроков агротехнических окон), производительности конкретной модели с учетом логистики (время на зарядку АКБ, заправку рабочего раствора, транспортировку к месту работы). Неравномерное внесение СЗР ведет к снижению

биологической эффективности обработок и потере урожая. Перерасход дорогостоящих СЗР и удобрений, приводит к финансовому ущербу. Увеличение сноса капель на соседние поля и в водоемы из-за неправильно выбранной высоты, скорости или типа форсунки влекут за собой экологические последствия [130, 137-138].

Дополнительным сдерживающим фактором широкого применения БАС с разбрасывателем является довольно высокая норма внесения удобрений (150-300 кг/га) и отсутствие современных обоснованных методик высева (например сидератов или риса). Применяются методы биологической защиты растений с применением энтомофагов (трихограммы, габрабракона, златоглазки). Внесение энтомофагов - эффективный способ комплексной биологической защиты растений. Российская компания «Летай и смотри» (FlySeeAgro) разработала способ, внесения энтомофагов на поля при помощи БАС. В 2022 году компанией получен патент на способ внесения сыпучих средств защиты растений и комплекс для его осуществления (рисунок 1.19). Для доставки и внесения применяется БАС. Энтомофаг вносится в автоматическом режиме в виде смеси зараженных энтомофагами яиц моли, которые отрождаются в течении 1-2 суток после внесения.



а) б) в)

1 - емкость для сыпучих средств защиты растений, 2 – дозатор, 3 - гофрированная труба, 4 - барабана с отверстием для сброса средств защиты растений, 5 - электродвигатель, 6 - редуктор, 7 - вал редуктора, 8 - дозирующее колесо, 9 - неодимовые магнитами, 10 - датчик Холла, 11 - мягкая прокладка, 12, 18, 20, 21 – кабель, 13 - блок управления, 14 - LED-дисплей, 15 - переменный

резистор, 16 - подстроенный резистор, 17 – ПИД -регулятор, 19 - GPS-компас, 21 - крепление комплекса к БАС.

Рисунок 1.19 - Схема дозатора: а) - принципиальная схема; б) - разрез по осевой линии фронтальной плоскости; в) - разрез по осевой линии горизонтальной плоскости

Внесение энтомофагов может осуществляться по команде полётного или маршрутного контроллера, с пульта оператора или по сигналам встроенной системы GNSS.

Известны случаи эффективного применения данного способа на кукурузе, сое, подсолнечнике, нуте, хлопке и картофеле. Обработка включает двукратное внесение энтомофагов в дозировке 3 грамма на один га в весенне-летний период. Данные применения показывают, что урожайность на обработанных полях на 4,7 ц/га выше, чем на полях с традиционной обработкой инсектицидами.

Компанией ООО «НовБиотех» разработана установка для лазерной обработки полевых и садовых растений. Лазерная фотоактивация (обработка) сельскохозяйственных культур – это непрерывное или импульсивное облучение семян или их всходов лучом лазера. Основной целью такой обработки является повышение урожайности, снижение заболеваемости растений различными инфекциями, развитие мощной корневой системы у с/х культур. В результате лазерной обработки увеличивается всхожесть семян, активируется синтез хлорофилла, за счёт чего растения быстрее развиваются и дают высокий урожай [57, 166]. Преимущества лазерной обработки: кратковременность воздействия, отсутствие отрицательных эффектов в широком диапазоне режимов лазерной обработки семян; стабильное повышение урожайности с/х культур в различных почвенно-климатических условиях; повышение качества с/х продукции (увеличение количества белков, углеводов и витаминов); возможность снижения нормы высева на 10-30% за счет повышения полевой всхожести семян и усиления ростовых процессов; повышение устойчивости растений к поражению различными заболеваниями; безвредность обработки для растений. Для лазерной обработки обширных посевных площадей применяются различные способы, суть которых заключается в использовании одного подвижного источника излучения,

последовательно обрабатывающего небольшие участки поля. В качестве такого передвигающегося источника излучения может быть использован беспилотный летательный аппарат с интегрированным подвесом блока лазерной кадровой развертки (рисунок 1.20) [57, 160, 189].



а) б)

Рисунок 1.20 - Изображение робототехнического устройства для фотостимуляции растений: а) - внешний вид; б) – лазерная установка

Лазерный модуль состоит из лазерного диода, оптической линзы, стабилизатора напряжения и драйвера лазерного диода. Лазерный модуль питается от аккумулятора 2200 мА/ч. Излучение лазерного модуля имеет форму квадрата со сторонами 1х1 м. Длина волны лазерного излучения равна 638 нм. Характеристики лазерного модуля: постоянная мощность лазера – 1 Вт, поверхностная плотность энергии – 1 Вт/м^2, угол веерного пучка– 60°.

Селекционно-генетический центр «ДокаДжин» предлагает программно-аппаратный комплекс, предназначенный для обнаружения растений картофеля, имеющих визуальные признаки хозяйственно значимых аномалий (вирусных, бактериальных, грибковых, а также сортовой неоднородности) в поле в ходе вегетации. Программно-аппаратный комплекс включает съемочный комплекс, а также устанавливаемое ПО, обеспечивающее визуализацию его результатов работы. Съемочный комплекс состоит из мини-ПК и ИИ-ускорителем, камеры компьютерного зрения, GPS-антенны, системы питания и соответствующего БАС

в качестве носителя. Используемые для диагностики нейросетевые модели постоянно пополняются производственными данными.

Беспилотные летательные аппараты с громкоговорителями и фонарями находят полезное применение в АПК (рисунок 1.21). Хотя их использование пока не так распространено, как опрыскивание или мониторинг, потенциал этой технологии велик. Динамик на БПЛА может применяться для отпугивания птиц и животных, например, растениеводство Краснодарского края теряется до 15-20% урожая из-за птиц ежегодно. Использование БАС с мощными фонарями открывает новые возможности для агропромышленного комплекса. Эта технология может применяться для ночного мониторинга, охраны, отпугивания вредителей и стимуляции роста растений. Применение БАС с тепловизорами и поисковыми прожекторами кратно увеличивает скорость и точность поиска. Они позволяют оперативно обследовать труднодоступные участки, обнаруживать тепловой след пропавших людей даже сквозь густую траву и дым, а также осуществлять прямое визуальное и инфракрасное сопровождение наземных спасательных групп.



а) б)

Рисунок 1.21 - Изображение БАС с оборудованием: а) – с динамиком; б) – с фонарем

БАС разных типов представляют собой многообещающий инструмент для атмосферных измерений, а именно для исследований вертикального или горизонтального распределения температуры, влажности, ветра, характеристик турбулентности и т. д. Использование БПЛА с компактными метеорологическими станциями открывает новые возможности для цифрового растениеводства, позволяя собирать актуальные погодные данные непосредственно над полями в

режиме реального времени. Показатели наземных метеостанций не всегда отражают условия на конкретном поле (особенно на больших площадях). Известно, что виноградники требуют контроля температурных инверсий – БПЛА с компактной метеостанцией помогают выявлять зоны риска заморозков. Технология особенно может быть полезна для садоводства, виноградарства и овощеводства, где критичен контроль микроклимата. Опрыскивание и внесение удобрений эффективны только при определенной погоде (ветер до 3–4 м/с, отсутствие дождя) для того, чтобы определить оптимальную высоту работы и параметры обработки так же могут быть полезны БПЛА с компактной метеостанцией на борту [49].

Согласно внутреннему стандарту ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.200.10.235-2016, БАС могут эффективно применяться и для диагностики сельских распределительных сетей (6-10 кВ и ниже). Возможности диагностики включают: выявление дефектов на трассах линий; обнаружение в охранных зонах посторонних предметов, несанкционированных работ, свалок, а также растительности (деревьев и кустарников), угрожающей проводам; осмотр состояния опор и проводов; обнаружение наклонов опор; разрушения изоляторов (сколы, трещины); обрывов проводов, набросов посторонних предметов, следов перекрытий и оплавлений на проводах; контроль тепловизором и ультрафиолетовыми лампами с выявлением мест перегрева в контактных соединениях, неисправных зажимов и разрядников, что критически важно для предотвращения аварий. БПЛА особенно эффективны для обследования протяженных участков в труднодоступной местности. Для сельских сетей, часто проходящих по пересеченной местности, это ключевое преимущество перед наземными осмотрами. БАС могут быть использованы как вспомогательное средство для прокладки проводов (закидка «пилотного» троса). БПЛА может перенести тонкий лидер-трос от одной опоры ЛЭП к другой, особенно в сложных условиях (через реку, овраг, лес). Затем этот трос используется для затяжки стального грозотроса или силового провода. Это эффективнее вертолета или ручной закидки.

Компанией «Лаборатория будущего» разработан комплекс «Канатоход» - уникальная российская система роботизированных БПЛА, предназначенная для автоматизированной диагностики, обслуживания и ремонта высоковольтных линий электропередач без отключения электричества. Большая беспилотная платформа БАС «Стрекоза» (рисунок 1.22а) оснащается тепловизорами, лазерными сканерами и видеокамерами, производит облет линии электропередач, проводит комплексный мониторинг состояния проводов и находит дефекты. На основе данных воздушной разведки тяжелый БПЛА-робот «Паук» (рисунок 1.22б) крепится на грозотрос или фазный провод, закрепляется и двигаясь вдоль провода на высоте выполняет детальное сканирование, ультразвуковую дефектоскопию, очистку от наледи или растительности и нанесение различных материалов (антикоррозионной, антигололедной или других типов смазки). Разрабатываются так же дополнительные платформы с различными инструментами на борту для проведения комплекса локальных монтажных работ.



а) б)

Рисунок 1.22 - Изображения устройств входяйщих в комплекс «Канатоход»: а) – БАС для диагностики «Стрекоза»; б) - БПЛА-робот «Паук»

Определен перечень ключевых технологических операций способных повысить загруженность БАС в АПК и составляющих объект исследования. Установлено, что наибольший потенциал повышения эффективности за счет применения БАС лежит в операциях внесения СЗР и мониторинга, но требуется разработка комплексной методологии с указанием соответствующих критериев оценки, конкретных, методик, способов и средств. Ограничивает широкое применение БАС отсутствие стандартизированной методики выбора оптимальной

модели БАС, типа камеры, высоты полёта и других параметров аэросъёмки в зависимости от типа сельскохозяйственной культуры, фазы её развития, целевых агрономических показателей. Последствия отсутствия такой методики влечет за собой неэффективное использование БАС, избыточную детализацию (затраты времени и объема данных), либо недостаточное качество данных для анализа.

1.3 Классификация БАС, энергетическая схема БАС и соответствующее программное обеспечение

Сегодня в свободной продаже имеется огромное количество БАС, с разными техническими и масса-габаритными показателями. Известны три варианта конструкции БАС: с фиксированным крылом, многодвигательные аппараты и гибридные. Каждый из вариантов имеет как достоинства, так и недостатки. В растениеводстве более востребованы БАС мультироторного типа: квадро-, гексо- и октокоптеры. Последние модели, выпускаемые производителями для сельского хозяйства основаны на схеме квадрокоптера, но с соосной схемой винто-моторной группы, что, по сути, представляет собой октокоптер, более компактной конструкции. Такое решение делает его более мобильным и простым в монтаже, что в полевых условиях очень важно для сельскохозяйственной техники [61, 198].

Классификация БАС также сегодня является темой многих дискуссий, предлагается делить БАС по разным признакам. Одним из показателей для классификации применяется средний взлётный вес (СВВ), так как этот показатель связан с кинетической энергией, передаваемой при столкновении БПЛА. В России имеется классификация (таблица 1.4), по которой БПЛА делятся на категории согласно их максимальной взлётной массе, дальности полета и назначению [211].

Таблица 1.4 - Классификация БПЛА по Российской универсальной классификации

Категория	Взлетная масса, кг	Дальность действия, км
Микро и мини БАС ближнего действия	0 – 5	25 – 40
Легкие БАС малого радиуса действия	5 – 50	10 – 70
Легкие БАС среднего действия	50 – 100	70 – 150 (250)
Средние БАС	100 – 300	150 – 1000
Средне – тяжелые БАС	300 – 500	70 – 300
Тяжелые БАС среднего радиуса действия	< 1500	1500

Эффективность выполнения полетных заданий напрямую зависит от корректного выбора и совместимости оборудования. Современный БАС представляет собой сложную систему, интегрирующую в себе множество компонентов и подсистем. Силовая установка (СУ) - наиболее энергоемкий узел (60-80% от общего потребления). СУ включает АКБ, контроллер системы управления батареей (BMS), систему распределения питания, регулятор скорости электродвигателя (ESC), бесколлекторный электродвигатель, воздушный винт (рисунок 1.22). Энергетические особенности компонентов СУ заключаются в значительных потерях мощности из-за высокого внутреннего сопротивления АКБ, коммутационных потерь в ESC, потерях в обмотках и магнитопроводе двигателя и аэродинамических потерь на винте [1, 8].

Система управления, навигации и связи содержит полётный контроллер (микроконтроллер/микропроцессор), инерциальный измерительный модуль (IMU), приемник GNSS (GPS/ГЛОНАСС), модули радиосвязи (RC для управления, телеметрии, иногда передачи данных) Характер потребления электрической энергии постоянный, относительно низкий (5-15%), но критически важный.

Оборудование для мониторинга (мультиспектральные, гиперспектральные камеры, тепловизоры, лидары, спороуловители) характеризуется варьированием мощности от нескольких ватт (компактные камеры) до сотен ватт (лидары, мощные

гиростабилизированные платформы), характер потребления электроэнергии импульсный или постоянный. Системы опрыскивания, платформы для внесения и дозаторы с электроприводами характеризуются значительным циклическим характером потребления электроэнергии [190]. Так же стоит учитывать дополнительные системы: сервоприводы рулевых поверхностей, системы освещения и сигнализации, системы термостабилизации. В таблице А1 (Приложение А) приведена классификация и описание основного оборудования, используемого в конструкциях БАС различного класса и назначения. Таблица включает такие позиции, как системы навигации и управления, бортовые датчики, каналы связи, силовые установки и полезную нагрузку, что позволяет получить комплексное представление о техническом оснащении аппарата [2]. На основе проведенного анализа разработана структурная энергетическая схема бортового оборудования для БАС мультироторного типа (рисунок 1.23)

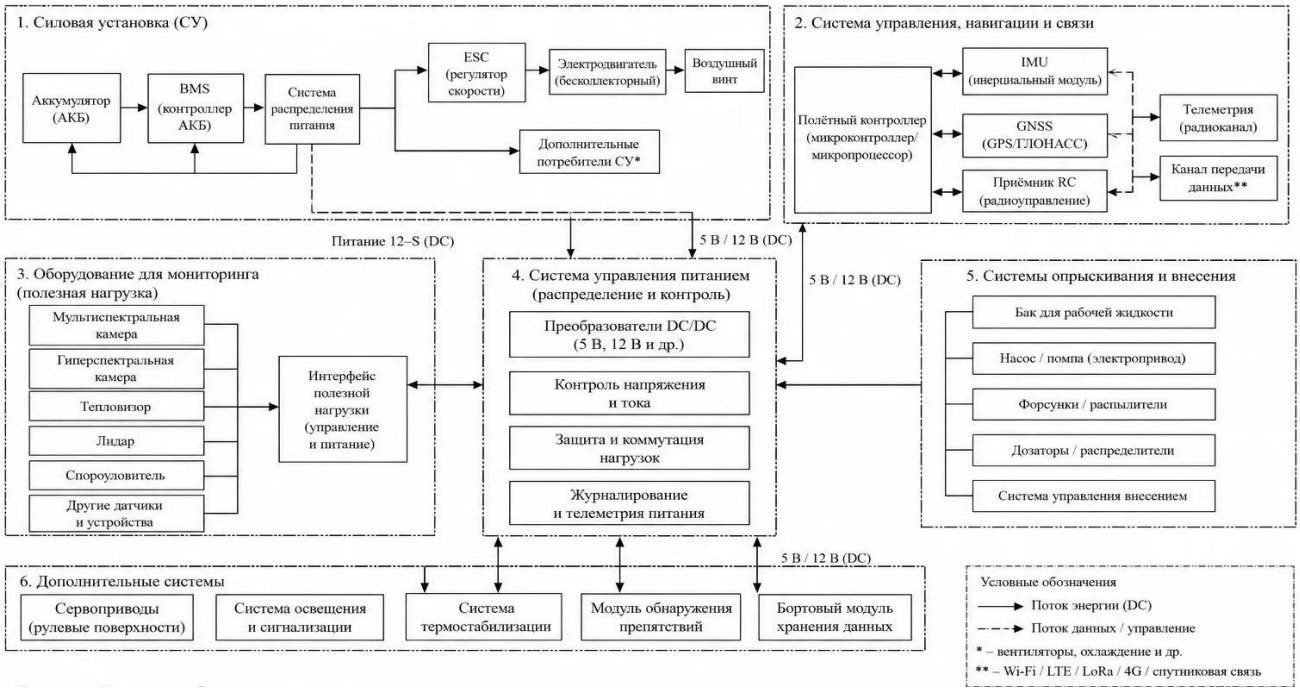


Рисунок 1.23 - Структурная энергетическая схема бортового оборудования БАС мультироторного типа

На территории Российской Федерации в растениеводстве для внесения сыпучих материалов и опрыскивания получили наибольшую востребованность БАС следующих производителей: DJI, XAG, JOYANCE TECH, Альбатрос (таблица А2 и таблица А3 Приложение А).

Для мониторинга применяются БАС с меньшей взлетной массой следующих производителей: DJI, EBee, Птеро, Геоскан, АС-КАМ (таблица А4 Приложение А). Такие модели, как DJI Phantom 4 Pro, все модели серии Mavic и Matrice, SenseFly eBee нашли применение для мониторинга, поскольку у них имеется все необходимое штатное оборудование. Они также могут быть оснащены подвесом для мультиспектральных и гиперспектральных камер и другого дополнительного оборудования [148]. В ходе исследований был выполнен анализ существующего оборудования для проведения работ по мониторингу (таблица 1.5). Их можно разделить на семейства: штатные камеры видимого диапазона, навесные камеры видимого диапазона, штатные мультиспектральные камеры, навесные мультиспектральные камеры, штатные тепловизоры, навесные тепловизоры, лидары.

Таблица 1.5 - Характеристики оборудования для мониторинга

Характеристика	RGB-камера	Мультиспектральная камера	Лазерный сканер (LiDAR)	Тепловизор (ИК-камера)
Тип БАС (примеры)	DJI Phantom 4 RTK, DJI Mavic 3E	DJI Matrice 300 + MicaSense, Parrot Bluegrass	DJI Matrice 350 + LiDAR (L1), WingtraOne + Riegl	DJI Matrice 300 + H20T, Autel EVO II Dual 640T
Фокусное расстояние	24–50 мм	5–16 мм (в зависимости от модели)	- (лазер)	9–50 мм (зависит от модели)
Тип матрицы	CMOS (Sony, Canon)	Мультиспектральная CMOS (глобальный затвор)	Фотодиоды (ToF-сенсоры)	Thermal
Разрешение сенсора	20–60 МП	2–12 МП на канал (RGB + NIR, RedEdge)	10 000–500 000 точек/сек	160×120 – 640×512 пикселей
Энергопотребление (камеры)	5–15 Вт	10–25 Вт	15–50 Вт	5–20 Вт
Энергопотребление БАС (среднее)	100–300 Вт (в полёте)	150–400 Вт (в полёте)	200–600 Вт (в полёте)	150–400 Вт (в полёте)
Время полёта (с камерой)	20–40 мин (зависит от БАС)	15–30 мин	12–25 мин (из-за веса LiDAR)	20–35 мин
Вес камеры	200–800 г	300–1200 г	500–2000 г	200–600 г
Диапазон спектра	400–700 нм (видимый свет)	400–900 нм (RGB + NIR, RedEdge)	900–1550 нм (лазерный луч)	8–14 мкм (тепловой ИК)

Характеристика	RGB-камера	Мультиспектральная камера	Лазерный сканер (LiDAR)	Тепловизор (ИК-камера)
Точность геоданных	1–10 см (с RTK)	1–10 см (с RTK)	1–5 см (точность по высоте)	1–5 м (зависит от разрешения)

Применение БАС для опрыскивания и внесения сыпучих материалов в растениеводстве сопровождается формированием соответствующей инфраструктуры для транспортировки, работы и обслуживания новой технологии. Формируются специализированные прицепные комплексы (рисунок 1.24). Прицепной комплекс обеспечивает перевозку и полный цикл работы двух и более БАС в полевых условиях. Оборудован безопасным рабочим местом для операторов, отсеками для всего необходимого оборудования и растворным узлом для сухих и жидких препаратов. Комплекс построен на базе двухосевого прицепа-платформы, пикапа или внутри фургона.



а) б)

Рисунок 1.24 - Изображение прицепного комплекса для работы с БАС в растениеводстве: а) – часть смесительного узла в составе прицепного комплекса; б) – отсек для транспортиковки БПЛА, АКБ и генераторов

Оборудование в составе смесительного узла следующее: бак объемом 240-500 литров для автономного смешивания и выдачи рабочего и маточного раствора, бортовые генераторы бензиновые мощностью от 1,1 до 15 кВт (по одному на каждый БАС), один малой мощности - для собственных нужд смесительного узла, перемешивающие устройства (механические или гидравлические, мощностью по

1,1 кВт, с понижающим редуктором, 674 об/мин для перемешивания рабочего раствора), насосы (на каждую емкость с рабочим раствором или в перемешивающем устройстве, мощность 0,75 кВт, напор до 85 м, подача: до 2,8 $м^3$/час), система освещения смесительного узла и рабочего места оператора.

Для создания карты-задания на полет, или анализа данных при мониторинге требуется разработка новых программных решений или использование существующих. Учитывая, что при интерпретации и апробации результатов исследований необходима и их программная реализация, разработка собственного программного комплекса представляется более корректным решением, т. к. полученные результаты и выводы могут иметь значительный коммерческий потенциал. В то же самое время существует ряд программных комплексов с открытым кодом, которые возможно использовать как основу. Все программы в итоге выдают трехмерную карту поверхности, которая позволяет проводить последующие измерения и исследования в различных ракурсах. При наличии мультиспектральных камер объем полученной информации значительно увеличивается и позволяет выявить качественно новые зависимости. Так же представляют практический интерес результаты систематизации передовых решений в области фотограмметрии. Анализ существующего ПО выявил комплексы, описанные ниже.

DroneDeploy 3D является ведущей компанией в области облачной обработки данных с беспилотных летательных аппаратов. Одним из достоинств данного программного продукта является наличие мобильной версии, которая позволяет управлять летательным аппаратом с мобильного устройства и получать карты поверхности. Обработка данных производиться через облачное хранилище, для чего не нужен высоко производительный компьютер, планшет или мобильный телефон. Недостатком является то, что предназначен этот программный комплекс для работы, в основном, с летательными аппаратами компании DJI, а для АПК нужен более универсальный инструмент, поддерживающий больше производителей БАС. Так же недостатком данного программного комплекса для АПК является то, что при построении полётного задания не учитываются местные

метеорологические условия. Учет скорости ветра на разных высотах и возможность использовать эту величину позволит повысить эффективность применения БАС.

Pix4D позволяет создавать объемные модели объектов и карт после обработки изображений с летательного аппарата. Программа позволяет, в частности, получить точечное множество, цифровую модель поверхности, ландшафт, нормализованные карты, карты с текстурированными поверхностями. Для обработки данных используется локальная версия, соответственно предъявляется высокие требования к ПК. Так же предоставляется мобильная версия для полетного задания в автоматическом режиме с очень простым и доступным интерфейсом, что позволяет освоить программу за очень короткий срок. Недостатком данного программного комплекса для АПК является то, что при построении полётного задания не учитываются местные метеорологические условия.

AutoDesk ReCap Pro - основная особенность данной программы это работа с дополненной реальностью. Позволяет создать объемную модель из фотографий либо данных лазерного сканера. После обработки информации на выходе либо множество точек, либо тело готовые для использования в программах автоматизированного проектирования, либо информационного моделирования зданий. Отсутствует мобильная версия, так же нет программы для полетного задания.

Maps Made Easy позволяет обрабатывать фотографии в объемные объекты либо в нормализованные карты поверхности. Доступна и облачная обработка снимков. Ограничение по количеству снимков для одного ортофотоплана – до 500 фото, для сравнения, при мониторинге поля площадью 100 га на высоте 70-100 м с камерой 12-20 МП количество фотографий 700-1400 шт.

3DF Zephyr позволяет воссоздать объемную модель из имеющихся фотоснимков. После обработки массива данных доступен экспорт в наиболее распространенные форматы данных и генерация видео. Процесс реконструкции полностью автоматизирован. Отсутствует мобильная версия, так же нет программы для полетного задания.

Open Drone Map – программный комплекс, состоящий из нескольких программных модулей, объединенных в одно целое и служащий для обработки

данных, полученных с беспилотных летательных аппаратов. Выпускается с открытым исходным кодом, что снижает капиталовложения при внедрении БАС на предприятиях. ПО используется на локальном рабочем месте, предъявляются высокие требования к производительности ПК. Позволяет строить трехмерные модели поля, строить карту перепада высот, считать площади и объемы, определять локальные координаты места. К недостаткам можно отнести отсутствие мобильной версии, нет программы для полетного задания.

ESRI Drone2Map разработана прежде всего для работы с программными продуктами компании ESRI, в частности с решениями в области ГИС – ArcGIS. Позволяет создавать нормализованные карты и объемные модели, а также моделировать вид с разных углов для дальнейшего использования в ArcGIS.

AutoCAD Map 3D является картографическим программным продуктом, который предназначен для планирования и управления инфраструктурой. Позволяет работать с данными систем автоматизированного проектирования и геоинформационными системами, поступающими из различных источников. К недостаткам можно отнести отсутствие мобильной версии, нет программы для полетного задания.

Precision Mapper & Viewer – облачный программный продукт для автоматизированной обработки данных, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов и предназначенный для генерации плоских и объемных моделей исследуемых объектов. К недостаткам можно отнести отсутствие мобильной версии, нет программы для полетного задания.

Agisoft PhotoScan – широко используемый программный продукт для обработки данных, полученных с беспилотных летательных аппаратов и предназначенный для генерации плоских и объемных моделей исследуемой поверхности. Metashape позволяет обрабатывать изображения, получаемые с помощью RGB- или мультиспектральных камер, включая мультикамерные системы, преобразовывать снимки в плотные облака точек, текстурированные полигональные модели, геопривязанные ортофотопланы и цифровые модели рельефа/местности (ЦМР/ЦММ). Автономная лицензия позволяет активировать программу только на одном компьютере. Нет программы для полетного задания.

DJI Pilot – разработка компании DJI, только для оборудования производства компании. Используется как мобильное приложение. Удобно для построения полетного задания для мониторинга и для агродронов серии T10-T60. При построении полетного задания не учитываются факторы оптимизации маршрута, типа модели и метеорологических условий. Нет постобработки изображений.

DJI Terra – это специализированное ПО от DJI для создания 2D-ортофотопланов и 3D-моделей. Оно оптимально работает с дронами DJI, предлагая полную интеграцию от полета до обработки данных непосредственно в облаке или на локальном компьютере.

QGroundControl – это бесплатная кроссплатформенная программа с открытым исходным кодом, популярная в сообществе PX4/ArduPilot. Она предоставляет robust-функционал для настройки, планирования и управления автономными дронами, но требует более глубоких технических знаний.

UgCS (Universal Ground Control Software) - это профессиональное коммерческое решение, славящееся продвинутым планированием сложных миссий, включая облет препятствий и работу с LiDAR. Оно поддерживает широкий спектр дронов и полезно для точных геодезических и инспекционных задач.

Имеются аналогичные программные комплексы других производителей, например, XAG или Joyance - совместимы только с оборудованием производителя. Перечень ПО их возможности применимости для АПК приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 - Таблица применимости ПО для БАС в АПК

Название	Обработка изображений	Полетное задание	Оптимизация полета	Локальная лицензия	Мобильная версия	Бесплатная версия
DroneDeploy	+	+	-	+	+	+
Pix4D	+	+	-	+	+	+
AutoDesk ReCap Pro	+	-	-	+	-	+
Maps Made Easy	+	-	-	+	-	+
3DF Zephyr	+	-	-	+	-	-
Open Drone Map	+	-	-	+	-	+
ESRI Drone2Map	+	-	-	+	-	-
AutoCAD Map 3D	+	-	-	+	-	-

Название	Обработка изображений	Полетное задание	Оптимизация полета	Локальная лицензия	Мобильная версия	Бесплатная версия
Precision Mapper & Viewer	+	-	-	+	-	-
Agisoft PhotoScan	+	-	-	+	-	-
DJI Pilot	-	+	-	-	+	+
DJI Terra	+	-	-	+	-	+
QGround Controll	-	+	-	+	+	-
UgCS	-	+	-	+	+	-

В результате представленного анализа направлений применения БАС, требований по каждому направлению и конструкций БАС с сопутствующей навесной техникой и ПО формируется область реализации технологии БАС в цифровом земледелии. Так же стоит определить оптимальные параметры связки комплекса БАС «БПЛА - Программное обеспечение – Агрегат» в различных технологических операциях в цифровом земледелии, разработать адаптированные для конечного пользователя программные продукты.

1.4 Анализ существующих методов оценки эффективности эксплуатации БАС в цифровом земледелии

Системный анализ существующих подходов к оценке эффективности БАС в цифровом земледелии основывается на критическом обзоре и структуризации известных подходов, что является основой для формулировки собственной комплексной системы критериев [29, 46].

Из анализа литературных источников можно систематизировать и выделить следующие методики по оценке эффективности БАС в цифровом земледелии: методика сравнительного стоимостного анализа, методика анализа «затраты-выгода», методика оценки эффективности по ключевым показателям

эффективности (KPI) цифрового земледелия, методика многофакторного / сценарного моделирования [108].

1. Методика сравнительного стоимостного анализа (традиционный ТЭО-подход). Сравнение стоимости проведения сельхозоперации (внекорневая подкормка, мониторинг, обработка) с использованием БАС и традиционных методов (наземная техника, пилотируемая авиация, спутники). Расчет включает удельные затраты на единицу площади (га).

Основные показатели - затраты на ГСМ или электроэнергию, амортизацию техники, зарплату оператора, стоимость СЗР и удобрений, производительность (га/час):

$$C_{\text{уд}} = \frac{A + \text{З} + \text{Э} + \text{М} + \text{Н}}{S} \quad (1.1)$$

где $C_{\text{уд}}$ - удельная стоимость обработки, руб./га; A - амортизационные отчисления при применении БАС/аппаратуры за период операции, руб.; З - заработная плата оператора/бригады с начислениями, руб.; Э - стоимость электроэнергии/топлива, руб.; М - стоимость материалов (СЗР, семена, удобрения), руб.; Н - накладные расходы (логистика, связь), руб.; S - обработанная/обследованная площадь, га.

Достоинствами данного метода являются простота и наглядность, быстрота расчетов, универсальность. Легко получить конкретное значение стоимости выполнения операции. Метод достаточно универсален и позволяет принять оперативное решение для разнообразных технологических операции. В тоже время имеются существенные недостатки, игнорируется качественный результат и не учитывается агрономическая и экологическая эффективность, подход достаточно устаревший. Экономия на обработке может привести к потерям урожая из-за менее точного внесения. Так же метод рассматривает операцию изолированно, не учитывает, что данные мониторинга БАС влияют на решение по подкормке, что, в свою очередь, снижает затраты на уборку и т.д. В методе не учитывается фактор времени, технология БАС позволяет провести обработку поля за 2 часа после выявления проблемы, в то время как в классической технологии потребуется более

длительное время на ожидание трактора, это время может спасти урожай, но в модели это не отражено.

2. Методика анализа «затраты-выгода» с агрономическими показателями. Более продвинутый метод, который пытается учесть не только прямые затраты, но и косвенные выгоды и потери, выраженные в денежной форме. Помимо затрат, включается оценка сохраненного/дополнительно полученного урожая (за счет точного внесения, раннего выявления болезней), экономия материалов (до 30-50% СЗР и воды), снижение уплотнения почвы (как будущая экономия):

$$\text{ЧПВ} = \frac{\sum B_t - C_t}{(1+d)^t} \tag{1.2}$$

$$B_t = \text{ДУ} \cdot \text{Ц}_\text{у} + \text{Э}_\text{м} + \text{Э}_\text{экол} \tag{1.3}$$

где ЧПВ - чистая приведенная выгода, руб.; B_t - совокупная выгода в году t, руб.; ДУ - дополнительный/сохраненный урожай, т/га; $\text{Ц}_\text{у}$ - цена реализации единицы урожая, руб../т; $\text{Э}_\text{м}$ - экономия материальных ресурсов (СЗР, вода, топливо), руб.; $\text{Э}_\text{экол}$ - стоимостная оценка экологического эффекта (например снижение штрафов и т.д.), руб.; C_t - совокупные затраты на использование БАС в году t, руб.; d - ставка дисконтирования, о.е.; t - период, год.

Достоинствами данного метода является учет агроэффекта, метод связывает технологию с конечным результатом - урожайностью, формируется более полная картина. Метод позволяет обосновать более высокие первоначальные затраты на БАС с долгосрочными выгодами. Недостатком является сложность точной оценки выгоды и зависимость от внешних факторов (погоды, квалификации агронома, точности алгоритмов). Результат расчетов носит нестабильный характер, при трансляции на другие предприятия. Так же метод сложно применим для вновь применимых технологий, в том числе и БАС.

3. Методика оценки эффективности по ключевым показателям эффективности (KPI) цифрового земледелия. Оценка вклада БАС в достижение конкретных измеримых агрономических и управленческих целей хозяйства. Основные показатели KPI: производительность мониторинга, оперативность реагирования (время от выявления проблемы до обработки); равномерность внесения, точность

выявления проблемных зон, экономия материальных ресурсов, увеличение урожайности на проблемных участках, снижение индекса экологической нагрузки за счет точечного внесения:

$$I_{эфф} = \sum (w_i \cdot (\frac{KPI_{i_{факт}}}{KPI_{i_{норма}}})) \quad (1.4)$$

где $I_{эфф}$ - интегральный показатель эффективности, о.е.; w_i - вес (важность) i-го показателя, о.е.; $KPI_{i_{факт}}$ - фактическое значение i-го KPI (скорость обследования, экономия, точность выявления болезней); $KPI_{i_{норма}}$ - плановое или; базовое (по старой технологии) значение i-го KPI.

Достоинством данной методики является комплексность и релевантность. Оценка ведется с разных сторон, соответствует стратегии хозяйства. Методика учитывает изменения в динамике - отслеживает прогресс по периодам и кампаниям. При анализе используются объективные данные измеримые данные (снимки, карты, тестовые отборы). При имеющихся достоинствах у методики есть существенные недостатки - сложность внедрения, требуется четкое определение перечня KPI, системы сбора и агрегации данных (платформы цифрового земледелия). Кроме того, сложно оценить вклад в результат именно БАС, например, при совместном использовании наземного наблюдения или спутниковых данных, если используются комплексно. Для специалистов, участвующих в реализации, предъявляются высокие требования к компетенциям. Необходимы специалисты-агрономы, способные работать с цифровыми данными.

4. Методика многофакторного (сценарного) моделирования. Использование цифровых моделей (агрономических, экономических) для прогнозирования эффекта от внедрения БАС при различных сценариях (погода, цены на ресурсы, состояние посевов). Основными показателями служат выход модели, прогноз финансово-экономических результатов (чистая приведенная стоимость, рентабельность) и агрономических показателей. Данная методика носит прогнозный характер. Позволяет оценить риски и потенциал до инвестиций. Позволяет производить учет неопределенности. В результате предлагается диапазон возможных результатов. Может интегрировать данные БАС в целостную

модель управления процессом. Недостатки (наиболее серьезные для практической реализации): требует специализированного ПО, данных для анализа за много лет, привлечения дополнительных экспертов. Результаты сильно зависят от заложенных в модель предположений и алгоритмов, которые не всегда прозрачны для агронома. Для большинства средних и малых хозяйств такая методика непрактична из-за ресурсоемкости.

5. Практико-ориентированная методика «пилотных проектов». Эмпирическое сравнение результатов на демонстрационных или эталонных участках с применением БАС и без него. Основные показатели фактические затраты, фактический урожай и его качество (клейковина, протеин и т.д.) на контролируемых участках:

$$\Delta = \frac{П_{тест} - П_{контроль}}{П_{контроль}} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

где Δ - относительное изменение целевого показателя, %; $П_{тест}$ - значение показателя на тестовом участке, с БАС (урожайность, затраты на операцию, содержание белка в зерне); $П_{контроль}$ - значение показателя на контрольном участке (урожайность, затраты на операцию, содержание белка в зерне).

Методика позволяет получить максимальную достоверность для конкретного хозяйства, учитывает все локальные особенности. Так же реализуется наглядность для принятия решений. Методика не предполагает сложных расчетов. На ряду с достоинствами, можно выделить недостатки, результаты одного сезона на одном поле могут не отражать общую картину. Неудачный пилотный запуск может компрометировать перспективную технологию. Для предприятия требует выделения ресурсов и минимум одного агрономического сезона.

Наибольшую практическую ценность сегодня представляет комбинированный подход - использование пилотных проектов для сбора реальных данных, на основе которых строятся агрономически обоснованные KPI, а затем проводится расширенный анализ «затраты-выгода». Простой стоимостной анализ необходим, но недостаточен, так как главный потенциал БАС не в прямой экономии на операции, а в повышении урожайности и качества продукции за счет

управления неоднородностями, что улавливают только более комплексные методики.

Взаимосвязь между выделенными методиками в литературе практически не исследуется. Это создает методологический пробел, который можно представить в виде незамкнутой причинно-следственной цепи (рисунок 1.25).

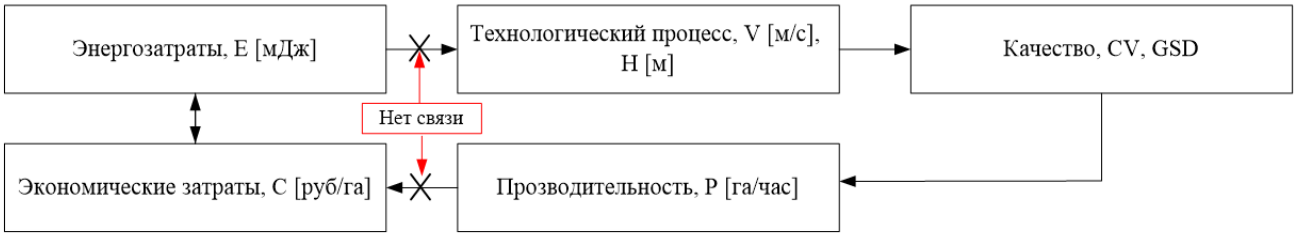


Рисунок 1.25 - Схема причинно-следственной цепи эффективной комплексной реализации БАС в цифровом земледелии

Для преодоления указанного пробела нужна иерархическая система критериев. Ее структура отражает причинно-следственные связи (рисунок 1.26).

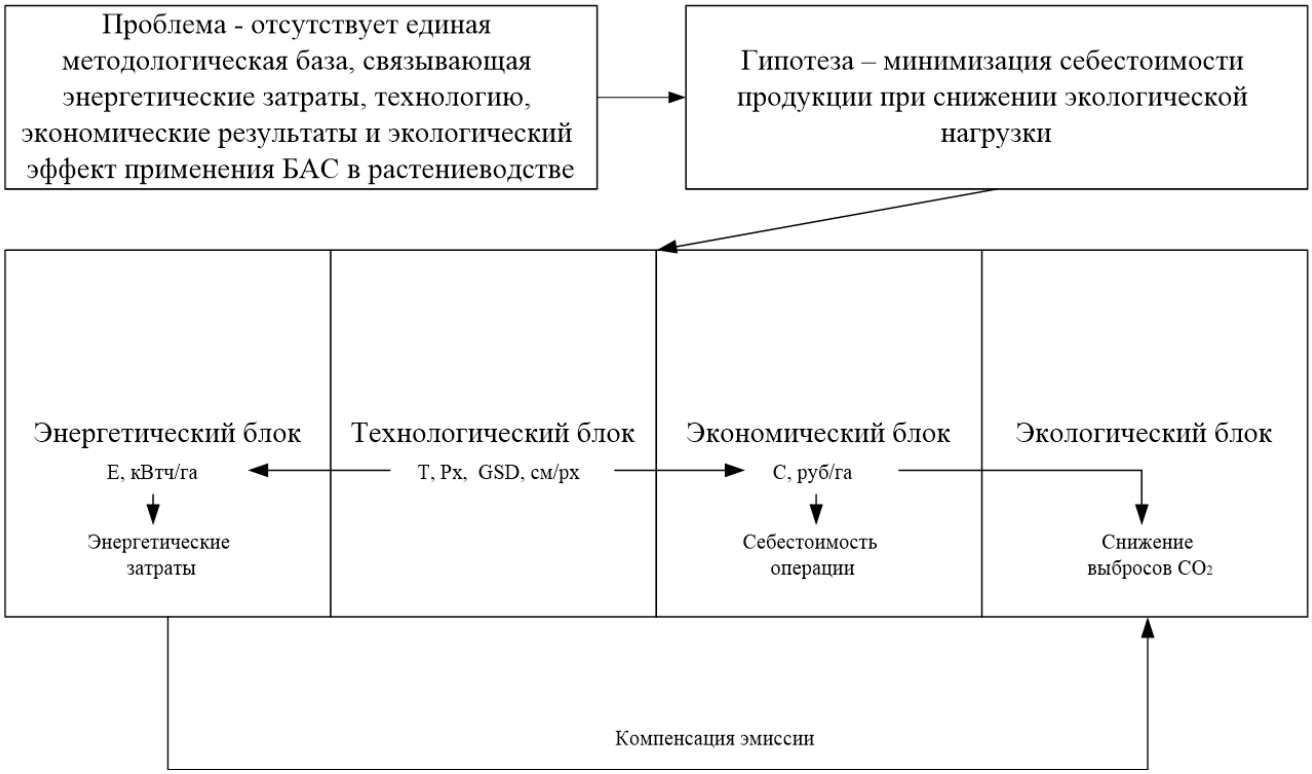


Рисунок 1.26 - Структура комплексной системы эффективности БАС

Для количественного описания представленных связей и решения задачи оптимизации требуется разработка комплекса моделей. Наиболее часто на практике текущего и перспективного планирования сельскохозяйственного производства используется модель оптимального доукомплектования машинно-тракторного парка новым оборудованием.

Анализ существующих подходов к оценке эффективности БАС в цифровом земледелии выявил, что не разработана комплексная методика, учитывающая многофакторность исследуемой технологии и разносторонние критерии. Существующие подходы носят разрозненный и несистемный характер. В соответствии с Национальным проектом «Технологическое обеспечение биоэкономики», направленным на создание условий для технологического обновления агропромышленного комплекса, а также Постановлением Правительства РФ от 09.09.2023 № 1473, в котором утверждена комплексная государственная программа Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности», в настоящее время оценка эффективности эксплуатации применяемых и внедряемых технологий в АПК должна производиться по двум ключевым аспектам: экономическому и энергетическому. Такой подход обусловлен необходимостью обеспечения не только финансовой целесообразности внедрения инновационных решений, но и рационального использования топливно-энергетических ресурсов, что соответствует стратегическим приоритетам государственной политики в области ресурсосбережения и устойчивого развития агропромышленного производства. В связи с этим оценка разработанных программно-аппаратных решений для беспилотных авиационных систем проводится с учётом обоих критериев - экономической и энергетической эффективности, что позволяет получить комплексное представление об их практической значимости и соответствии современным нормативно-правовым требованиям.

1.5 Выводы по главе, цель и задачи исследования

1. В России сформирована нормативно-правовая и технологическая база для цифровой трансформации сельского хозяйства, однако существующие программы и платформы носят преимущественно декларативный характер и слабо увязаны с конкретными механизмами внедрения БАС, что требует разработки прикладных методик на уровне отдельных хозяйств.

2. Применение БАС охватывает все ключевые этапы растениеводства - от мониторинга всходов до дифференцированного внесения удобрений и СЗР, а также включает перспективные направления (биозащита, лазерная стимуляция, метеонаблюдения и т. д.). Однако широта возможностей не подкреплена унифицированными методиками выбора оборудования и режимов работы, что снижает эффективность внедрения.

3. Существующая номенклатура БАС и навесного оборудования позволяет решать большинство агротехнологических задач, а предложенная энергетическая схема даёт основу для оптимизации энергопотребления. В то же время анализ ПО показывает отсутствие универсальных решений, интегрирующих планирование полёта, обработку данных и формирование карт-заданий с учётом агрономических требований.

4. Известные методики оценки отражают лишь отдельные аспекты эффективности БАС и не образуют целостной системы, связывающей экономику, энергопотребление, качество агрооперации и экологический эффект, что обосновывает необходимость разработки комплексного критериального подхода.

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 мощность 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.

2. МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ БАС В АПК

2.1 Разработка комплексной системы критериев оценки эффективности эксплуатации БАС

Обоснование целесообразности внедрения новых технологий требует комплексного экономического анализа, учитывающего как прямые затраты и выгоды, так и качественные эффекты, которые трудно оценить количественно. Известны методы экономической оценки сельскохозяйственной техники [22, 38, 120, 167-169], но можно предложить подход, адаптированный для анализа эффективности использования БАС по нескольким аспектам: финансовому, операционному, ресурсному и экологическому, что обеспечивает комплексность подхода и обоснованность принимаемых решений. Методика должна включать оценку эксплуатационных расходов, потерь продукции, убытков от недоиспользования потенциала техники, а также качественных эффектов, таких как сохранение урожая, экологические преимущества и повышение точности операций. Кроме того, необходимо учитывать факторы поэтапности внедрения, кредитного финансирования и риски, связанные с сельскохозяйственным производством. В связи с этим разработка методики оценки эффективности внедрения БАС становится актуальной задачей, позволяющей сельскохозяйственным предприятиям принимать взвешенные инвестиционные решения [3, 44, 87, 121].

Для нового проекта должно выполняться условие, при котором основной показатель экономической эффективности $Э_{эф} > 0$:

$$Э_{эф} = \frac{\sum_i^T Э_i}{I_0} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

где $Э_i$ – годовые экономические эффекты за инвестиционный период, руб.; I_0 – объём капитальных инвестиций (включая капитальные вложения), руб.

При внедрении технологий БАС показатель экономической эффективности будет пропорционален доходам $Д_i$, тогда получаем выражение:

$$Э_i \equiv Д_i \quad (2.2)$$

Показатель экономической эффективности можно определить по формуле:

$$Э_{эф} = \frac{\sum_i^T Д_i}{I_0} \cdot 100\% \quad (2.3)$$

При разработке типовых исходных требований на базовые машинные технологические операции в растениеводстве отбираются наиболее экономичные агрегаты, тогда доходы можно определять по выражению [5]:

$$Д_i = \Delta С_{\varphi is} + П_{пр\varphi is} - У_{пр\varphi is} \quad (2.4)$$

где $\Delta С_{\varphi is}$ – доход от снижения эксплуатационных затрат, руб.; $П_{пр\varphi is}$ – доход от снижения потерь продукции при использовании, руб.; $У_{пр\varphi is}$ – убыток от недоиспользования потенциала агрегата, руб.

Для случая внедрения БАС и замены новой технологией возделывания, существующей традиционной, получаем выражение доходов с применением БАС:

$$Д_{i\ БАС} = С_{эксп,трад} - С_{эксп,БАС} + П_{пр,БАС} - У_{пр,БАС} + B_{эффект} + B_{эк} \quad (2.5)$$

где $С_{эксп,трад}$ и $С_{эксп,БАС}$ – эксплуатационные затраты традиционной технологии и при применении БАС, руб.; $П_{пр,БАС}$ – дополнительный доход от снижения потерь продукции при использовании БАС, руб.; $У_{пр,БАС}$ - убыток от недоиспользования потенциала БАС, руб.; $B_{эффект}$ – эффект экономии водного ресурса, руб.; $B_{эк}$ – экологический эффект, руб.

При традиционном подходе эксплуатационные затраты найдем по формуле:

$$С_{эксп,трад} = З_{О.Т.тр} + З_{ТСМтр} + З_{Ртр} + А_{тр} + И_{В.Мтр} \quad (2.6)$$

где $З_{О.Т.тр}$ – затраты денежных средств на оплату труда обслуживающего персонала, руб.; $З_{ТСМтр}$ – затраты денежных средств на оплату горюче-смазочных материалов (ГСМ), руб.; $З_{Ртр}$ – затраты денежных средств на ремонт и техническое обслуживание, руб.; $А_{тр}$ – амортизационные отчисления, руб.; $И_{В.Мтр}$ – издержки денежных средств на вспомогательные технологические материалы, руб.

При применении БАС эксплуатационные затраты найдем по формуле:

$$С_{эксп,БАС} = \alpha_\tau \cdot k_{риск} \cdot (З_{ОП} + З_{эл/зар} + З_{рем} + А_{БАС} + З_{мат}) \quad (2.7)$$

где α_τ – коэффициент учет поэтапности внедрения, принимаем равным 1; $k_{\text{риск}}$ – коэффициент влияния возможных рисков (технологических, климатических, рыночных); $З_{ОП}$ – оплата труда персонала (оператора БАС и аналитика данных), руб.; $З_{эл/зар}$ – затраты на электроэнергию для зарядки аккумуляторов, руб.; $З_{рем}$ – затраты на ремонт и ТО, руб.; $А_{БАС}$ – амортизация БАС и сопутствующего оборудования (ПК, ПО) , руб.; $З_{мат}$ – расходные материалы (например, химреактивы для анализа проб, если берутся пробы) , руб.

Идентификация и категоризация ключевых рисков представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Идентификация и категоризация ключевых рисков

Категория рисков	Конкретные риски	Значение критерия
Технологические	Выход из строя БАС. Быстрый моральный износ технологии или ПО. Низкое качество данных. Несовместимость с существующей инфраструктурой.	0,5 – 0,7 - максимальная неопределённость, персонал учится, технологии только начинают внедрятся, выявляются скрытые проблемы, низкая загрузка БАС, высокие операционные и кадровые риски; 0,75 – 0,85 - основные процессы отлажены, но не все операции переведены на БАС, остаются риски интеграции и масштабирования; 0,9 – 0,95 - риски преимущественно внешние (рыночные, климатические).
Климатические и агрономические	Неблагоприятные погодные условия (дождь, ветер, град) ограничивающие полёты. Нетипичное развитие болезней/вредителей. Засуха или переувлажнение почвы.	
Рыночные, экономические и политические	Падение цен на сельхозпродукцию. Рост цен на электроэнергию, ПО, услуги. Изменение субсидий или цены на углеродные квоты (актуально для других стран, например Японии). Колебания валютных курсов (если техника импортная), сложности импорта техники и запасных частей.	
Операционные и кадровые	Дефицит квалифицированных операторов/аналитиков. Сопротивление персонала новым технологиям. Ошибки в применении данных, ведущие к потерям.	
Нормативно-правовые	Ужесточение законодательства БАС. Изменение экологических норм по внесению СЗР.	

Оплата труда персонала $З_{ОП}$ с учётом перераспределения обязанностей в существующем коллективе рассчитываются по выражению:

$$З_{ОП} = N_{оп} \cdot C_{оп} + N_{д} \cdot C_{д} \quad (2.8)$$

где $N_{оп}$ – количество операторов БАС, чел; $C_{оп}$ – зарплата оператора, руб. /чел; $N_{д}$ – количество аналитиков чел; $C_{д}$ – зарплата аналитика руб./чел.

Энергозатраты $З_{эл/зар}$ составят:

$$З_{эл/зар} = E_{БАС} \cdot P_{эл\ эн} \quad (2.9)$$

где $E_{БАС}$ - потребление электроэнергии БАС на заряд АКБ, кВт·ч; $P_{эл\ эн}$ – тариф на электроэнергию, руб./кВт·ч.

Если заряд производится от бензогенератора, то производится расчет с учётом коэффициента пересчета (для сравнения энергоемкости) примем: 1 л ГСМ ≈ 10 кВт $\cdot$ ч.

Затраты на ремонт $З_{рем}$ составят:

$$З_{рем} = C_{АКБ} + C_{ремонт} + C_{обн\ ПО} \quad (2.10)$$

где $C_{АКБ}$ – стоимость замены аккумуляторов (каждые 2-3 года или от 500 до 1000 циклов) руб./год; $C_{ремонт}$ – стоимость ремонта оборудования руб./год; $C_{обн\ ПО}$ – стоимость обновления ПО или поддержки лицензии, руб./год, $C_{проч}$ - прочие затраты, руб./год.

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

$$П_{пр,БАС} = \Delta У_{сохр} = S_{обр} \cdot У \cdot Ц_{зерна} \cdot K_{у} \quad (2.11)$$

где $\Delta У_{сохр}$ – стоимость дополнительного урожая в денежном выражении благодаря применению БАС, руб. (потери продукции могут быть выражены отрицательным числом); $S_{обр}$ - площадь обработки, га; У - урожайность, ц/га; $Ц_{зерна}$ – сложившаяся цена культуры руб./кг; $K_{у}$- прирост урожая, о.е.

В рамках разработанной методологии значение прирост урожая не является константой, а представляет собой результат успешного выполнения всего комплекса агротехнологических операций с применением БАС. Этот показатель является ключевым в оценки агротехнологической эффективности применения БАС и входит в состав экономических и энергетических критериев оценки. На

основе представленных моделей, могут быть определены ориентировочные диапазоны прироста урожая (таблица 2.2).

Таблица 2.2 - Ориентировочные диапазоны прироста урожая с примененим БАС

Культура	Ожидаемый диапазон $K_{\text{у}}$, о.е.
Пшеница (озимые)	0,10–0,25
Кукуруза	0,08–0,20
Подсолнечник	0,05–0,15
Соя	0,07–0,18
Рис	0,10–0,20

Убыток от недоиспользования потенциала БАС можно определить следующим образом:

$$\text{У}_{\text{пр,БАС}} = \sum_{i}^{T} B_j \cdot d \cdot \delta \qquad (2.12)$$

где B_j – балансовая стоимость БАС, d – годовая процентная ставка депозита (вклада, ценных бумаг), о.е.; δ – коэффициент загрузки БАС.

Расчет коэффициента загрузки БАС δ основывается на времени использования БАС:

$$\delta = \frac{T_{\text{ф}}}{T_{\text{max}}} \qquad (2.13)$$

где $T_{\text{ф}}$ - фактическое время полезной работы БАС за период, ч ($T_{\text{ф}}$ включает время выполнения целевых задач (мониторинг, съемка, опрыскивание и т.д.); T_{max} - максимально возможный (эффективный) фонд рабочего времени БАС за тот же период.

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

$$T_{\text{max}} = T_{\text{календ}} - T_{\text{регламент}} - T_{\text{метео}} - T_{\text{простой}} \qquad (2.14)$$

где $T_{\text{календ}}$ - общее количество часов в периоде (в 2026 году при пятидневной рабочей неделе ожидается 247 рабочих дней, при 40-часовой рабочей недели - 1 972 часа); $T_{\text{регламент}}$ - время, необходимое на обязательное техническое обслуживание, регламентные работы и ремонт, ч (техническое обслуживание,

замена аккумуляторов (ресурс 500-1000 циклов), калибровка, примем 150 часов в год); $T_{\text{метео}}$ - время, в течение которого полеты невозможны из-за погодных условий, ч (для конкретного типа БАС и региона, в среднем для ЮФО это около 30-40% дней в полевой сезон (апрель-сентябрь), примем 350 часов в год); $T_{\text{простой тех}}$ - время вынужденного простоя по техническим причинам, ч (примем 50 часов).

Для крупного интенсивного хозяйства с парком техники БАС коэффициент загрузки может достигать 0,8–0,85. Это означает, что техника используется эффективно, но не на 100% из-за объективных погодных и регламентных ограничений. Для консервативного прогноза рекомендуется поддерживать δ = 0,60 - 0,65; на сегодняшний день, из-за недоиспользования БАС в технологических операциях, коэффициент загрузки может опуститься до 0,18.

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

$$B_{\text{эффект}} = S_{\text{обр}} \cdot (N_{\text{трак}} - N_{\text{факт}}) \cdot \text{Ц}_{\text{воды}} \quad (2.15)$$

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

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

$$B_{\text{эк}} = (Q_{\text{топлтрад}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}} - Q_{\text{топлБАС}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}}) \cdot P_{CO_2} \quad (2.16)$$

где $Q_{\text{топлтрад}}$ – расход ГСМ при традиционном методе кг; $\varepsilon_{\text{топл}}$ - коэффициент выбросов CO_2 от ГСМ, т CO_2/л (для бензина 2,31 кг CO_2, дизельного топлива 2,68 кг CO_2); $Q_{\text{топлБАС}}$ - расход ГСМ при использовании БАС, кг; P_{CO_2} - цена углеродных квот, руб./кг CO_2 (обсуждается в виде субсидии при организации экологически чистого производства, примерно 7,5 руб./кг CO_2).

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

$$I_0 = I_{\text{БАС}} + I_{\text{оборуд}} + I_{\text{обуч}} + I_{\text{ПО}} + I_{\text{инфра}}, \quad (2.17)$$

где $I_{\text{БАС}}$ - стоимость БАС и аккумуляторов, руб.; $I_{\text{оборуд}}$ - мультиспектральные камеры, системы внесения СЗР, руб.; $I_{\text{обуч}}$ - стоимость обучения персонала, руб.;

$I_{ПО}$ – стоимость ПО для анализа данных, руб.; $I_{инфра}$ - стоимость инфраструктуры (например, смесительный узел, и т.п.), руб.

Примем расчет на уровне инвестиционного проекта, где основной показатель - чистая приведенная стоимость (NPV) [3,29,108]. Рентабельность инвестиций оценивается за период 5 лет. NPV может быть найдена по выражению:

$$NPV = -I_0 + \sum_{t=0}^{T} \frac{Д_i}{(1+r)^t} \quad (2.18)$$

Величина банковской ставки r принимается по текущей экономической ситуации. Проект считается эффективным если $NPV > 0$.

В случае недостатка собственных средств придется прибегнуть к заемным средствам. Ежегодный платеж по кредиту P_t определим по выражению:

$$P_t = I_0 \cdot \frac{r(1+d)^i}{(1+d)^i - 1}, \quad (2.19)$$

где t - срок кредита, годы.

Для принятия инвестиционных решений финансовый расчёт обычно производится в рублях (или иной валюте). Однако такой подход возможен только в отдельных случаях больше при разовых расчётах и проектных работах. Работа в сельскохозяйственных предприятиях имеет особенность: зависимость от погодных условий, конъюнктуры цен на товары и материалы, экономической и политической ситуации регионе и стране. Особенно это отражается в случае длительной эксплуатации новых технологий, когда изменяются цены на продукцию, ГСМ, электроэнергию, другие ресурсы; резко меняются погодные условия такие расчеты дают большую погрешность. Возникает потребность в применении критерия экономической эффективности, который позволит сравнивать выше названные факторы, а также проекты с разными условиями (разные поля, культуры, регионы) на единой безразмерной шкале. Такой критерий делает невидимые риски (низкая загрузка, плохая операционная деятельность, кадровые проблемы) видимыми через соответствующие коэффициенты, сразу понятно, какой параметр влияет на эффективность. Внедрение подобного критерия с учетом текущей ценовой

коньюнктуры не отменяет финансовый расчёт, а дополняет его, позволяя лицу, принимающему решение (агроному, техническому специалисту, руководителю), видеть полную картину, а не только итоговую цифру прибыли.

Общий критерий экономической эффективности стоит рассчитывать исходя из учета показателя чистой приведенной стоимость и коэффициента экономической эффективности $К_{экэ}$. Такой подход позволит оценить эффективность применяемых технологий не только с точки зрения вложенных и окупаемых средств в эквиваленте валюты, но и применить многостороннюю оценку влияния различных факторов на экономическую составляющую в относительных единицах. Данный коэффициент носит характер сводного оценочного индекса и требует взвешивания или экспертной интерпретации, его следует рассчитывать как сумму отдельных коэффициентов экономической эффективности:

$$К_{экэ} = K_{рент} + K_{уст} + K_{вод\,рес} + K_{зам} + K_{пром} + K_{пров} + K_{экол} \qquad (2.20)$$

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

Коэффициент рентабельности инвестиций $K_{рент}$ равен:

$$K_{рент} = \frac{NPV}{I_0} = \frac{-I_0 + \sum_{t=0}^{T} \frac{Д_i}{(1+r)^t}}{I_0} \qquad (2.21)$$

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

$$K_{уст} = \frac{DSCR}{DSCR_{max}} \qquad (2.22)$$

где $DSCR$ - коэффициент покрытия долга, о.е.; $DSCR_{max}$ – порог устойчивости предприятия для покрытия долга при обслуживании финансовых обязательств (1,5), о.е.

$DSCR$ это коэффициент, показывающий способность оплачивать текущие кредитные обязательства (основной долг и проценты) за счет генерируемого денежного потока. $DSCR$ можно рассчитать по формуле:

$$DSCR = \frac{Д_i - I_0}{P_t} \tag{2.23}$$

Если $DSCR$ меньше 1,0 - у предприятия не хватает свободных финансов для покрытия долгов, высок риск технического дефолта; 1,0 – 1,2 - пограничная зона, бизнес справляется с выплатами, но, малейшее падение выручки приведет к проблемам;1,2 – 1,5 - комфортный уровень, показывающий, что предприятие может обслуживать обязательства, но большого запаса прочности нет; больше 1,5 - безопасный уровень, денежного потока хватает с избытком, предприятие финансово устойчиво.

Коэффициент экономии водного ресурса $K_{\text{вод рес}}$ равен:

$$K_{\text{вод рес}} = \frac{S_{\text{обр}} \cdot (N_{\text{трак}} - N_{\text{факт}}) \cdot Ц_{\text{воды}}}{S_{\text{обр}} \cdot N_{\text{трак}} \cdot Ц_{\text{воды}}} \tag{2.24}$$

Коэффициент замещения топлива $K_{\text{зам}}$ находится по выражению:

$$K_{\text{зам}} = \frac{(Q_{\text{топл}} \cdot P_{\text{топл}}) - (E_{\text{БАС}} \cdot P_{\text{эл эн}})}{Q_{\text{топл}} \cdot P_{\text{топл}}} \tag{2.25}$$

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

Коэффициент производительности работ по мониторингу определяется по выражению:

$$K_{\text{пром}} = \frac{S_{\text{БАСМ}}/t_{\text{БАСМ}}}{S_{\text{традМ}}/t_{\text{традМ}}} \tag{2.26}$$

где $S_{\text{БАСМ}}, S_{\text{традМ}}$ - площадь мониторинга с помощью БАС и традиционным способом (можно принимать методы спутникового мониторинга), га; $t_{\text{БАСМ}}, t_{\text{традМ}}$ - время выполнения операции, ч.

Коэффициент производительности работ по внесению СЗР, удобрений и семян рассчитывается по выражению:

$$K_{\text{пров}} = \frac{S_{\text{БАСВ}}/t_{\text{БАСВ}}}{S_{\text{традВ}}/t_{\text{традВ}}} \quad (2.27)$$

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

Коэффициент экологической эффективности $K_{\text{экол}}$ рассчитывается:

$$K_{\text{экол}} = \frac{Q_{\text{топлтрад}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}} - Q_{\text{топлБАС}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}}}{Q_{\text{топлтрад}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}}} \quad (2.28)$$

Общая формула для определения интегрального коэффициент экономической эффективности $К_{экэ}$ примет вид:

$$\begin{aligned} К_{экэ} = {} & \frac{-I_0 + \sum_{t=0}^{T} \frac{Д_i}{(1+r)^t}}{I_0} + \frac{DSCR}{DSCR_{max}} + \frac{S_{\text{обр}} \cdot (N_{\text{трак}} - N_{\text{БАС}}) \cdot Ц_{\text{воды}}}{S_{\text{обр}} \cdot N_{\text{трак}} \cdot Ц_{\text{воды}}} \\ & + \frac{(Q_{\text{топл}} \cdot P_{\text{топл}}) - (E_{\text{БАС}} \cdot P_{\text{эл эн}})}{Q_{\text{топл}} \cdot P_{\text{топл}}} + \frac{S_{\text{БАСМ}}/t_{\text{БАСМ}}}{S_{\text{традМ}}/t_{\text{традМ}}} + \frac{S_{\text{БАСВ}}/t_{\text{БАСВ}}}{S_{\text{традВ}}/t_{\text{традВ}}} \\ & + \frac{Q_{\text{топлтрад}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}} - Q_{\text{топлБАС}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}}}{Q_{\text{топлтрад}} \cdot \varepsilon_{\text{топл}}} \end{aligned} \quad (2.29)$$

В базовой постановке $К_{экэ}$ рассчитывается как простая сумма семи коэффициентов, что подразумевает их равнозначность. Так для инвестиционно-ориентированных хозяйств приоритетными являются – $K_{\text{рент}}$ и $K_{\text{уст}}$, для операционных подразделений – $K_{\text{вод рес}}$, $K_{\text{пром}}$ и $K_{\text{пров}}$, для экспортноориентированных производителей с углеродной отчетностью – экологическая составляющая в $K_{\text{экол}}$. Однако, в реальных условиях сельскохозяйственного предприятия, значимость коэффициентов может различаться, они позволяют количественно оценить эффективность внедрения БАС по нескольким аспектам: финансовому, операционному, ресурсному и экологическому, обеспечивая комплексный подход к принятию решения. Исходя из представленной методики вычисления $К_{экэ}$ и соответствующих коэффициентов можно выделить те параметры, которые оказывают значимый вклад и имеется возможность оказать влияние на их значение. Значения границ коэффициентов и

управляемые параметры, оказывающие на них набольшее влияние представлены в таблице 2.3. Так, например, при оценке коэффициента рентабельности $K_{\text{рент}}$ нет методов воздействия на ключевую ставку, но в тоже время можно разрабатывать адаптированное ПО и дополнительные способы и средства для снижения количества операторов или аналитиков, совершенствовать существующие и разрабатывать новые способы применения БАС в АПК, тем самым повышать коэффициент загрузки техники, предпринимать меры по увеличению производительности работ или сокращению времени на выполнение технологических операций с БАС.

Таблица 2.3 - Сводная таблица значений коэффициентов определяющих $К_{экэ}$ и параметров влияния

Критерий	Диапазон значений	Параметр оказывающий влияние
$K_{\text{рент}}$	0-3,4	$k_{\text{риск}}$, $З_{ОП}$, $З_{эл/зар}$, $\boldsymbol{K}_{\text{у}}$, $\boldsymbol{\delta}$, $\boldsymbol{N}_{\text{факт}}$
$K_{\text{уст}}$	0,8-1,25	r, d, $l_{\text{БАС}}$, $\boldsymbol{I}_{\text{оборуд}}$, $\boldsymbol{I}_{\text{обуч}}$, $\boldsymbol{I}_{\text{ПО}}$, $\boldsymbol{I}_{\text{инфра}}$
$K_{\text{вод рес}}$	0,8-0,98	$N_{\text{факт}}$
$K_{\text{зам}}$	0,5-0,99	$\boldsymbol{E}_{\text{БАС}}$
$K_{\text{пром}}$	0,5-1,5	$\boldsymbol{S}_{\text{БАСМ}}$, $\boldsymbol{t}_{\text{БАСВ}}$
$K_{\text{пров}}$	0,3-2	$\boldsymbol{S}_{\text{БАСВ}}$, $\boldsymbol{t}_{\text{БАСВ}}$
$K_{\text{экол}}$	0,7-0,99	$\boldsymbol{Q}_{\text{топлБАС}}$
$K_{\text{экэ}}$	3,6-11,11	-

Ряд выделенных параметров находятся в общей плоскости, и объединяет их качество построения полетного задания. Для практического управления эффективностью необходимо «развернуть» эти параметры в сторону конкретных инженерных решений и технологических факторов с учетом метеорологической обстановки (через состояние деятельного и приземного слоев), гидродинамических и аэродинамических процессов, технических характеристик БПЛА и рабочих органов, дополнительных технологий (например электротехнологий).

Для наглядной оценки веса каждого параметра разработана диаграмма коэффициентов для трёх базовых сценариев, различающихся по уровню интеграции технологий, загрузки оборудования и степени учёта качественных

эффектов для типового хозяйства с площадью 1000 га (рисунок 2.1). Сценарий 1 (пилотный) характеризуется низкой загрузкой БАС ($\delta \approx 0{,}18$), высокой долей рисков ($k_{\text{риск}} \approx 0{,}5 - 0{,}7$) и минимальным учётом качественных эффектов. Значения $K_{\text{рент}}$ и $K_{\text{уст}}$ находятся в зоне низкой или отрицательной эффективности, что делает проект экономически низкорентабельным. Сценарий 2 (частичный) предполагает частичное внедрение БАС (средний уровень загрузки ($\delta \approx 0{,}6$) и учёт основных качественных выгод (снижение потерь продукции, экономия ресурсов). Практически все коэффициенты достигают удовлетворительных значений. Сценарий 3 (полная интеграция) соответствует полной интеграции БАС, высокой загрузке ($\delta \approx 0{,}8 - 0{,}85$), минимальным рискам ($k_{\text{риск}} \approx 0{,}9$) и полному учёту экологических и качественных эффектов. При этом высокая рентабельность инвестиций, $K_{\text{уст}}$ приближается к уровню 1,5, а $K_{\text{экол}}$ превышает 0,9. Диаграмма наглядно демонстрирует, что при переходе от консервативного к оптимистичному сценарию интегральный критерий $К_{\text{экэ}}$ возрастает нелинейно, причём основной вклад вносят коэффициенты $K_{\text{рент}}$, $K_{\text{пром}}$ и $K_{\text{пров}}$.

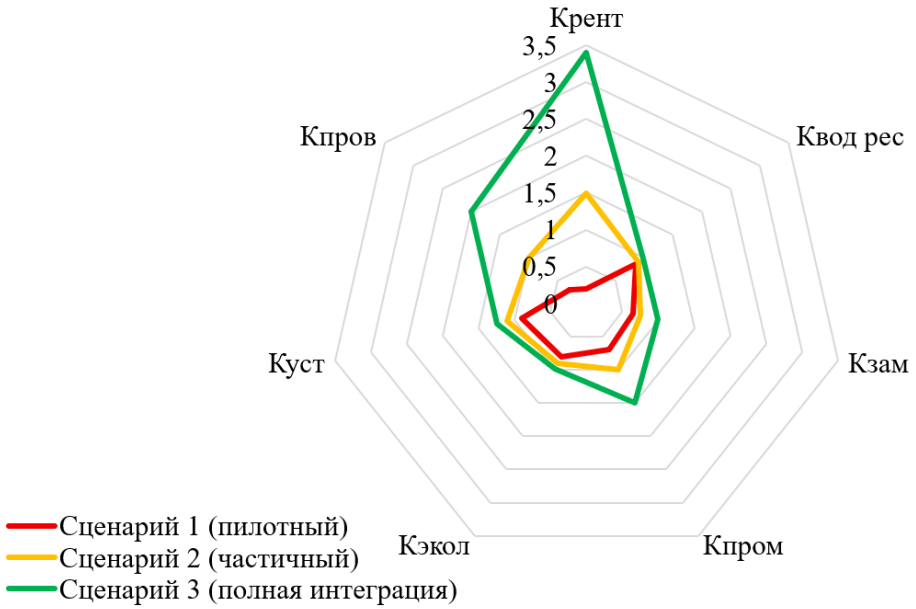


Рисунок 2.1 - Диаграмма коэффициентов при различных сценариях реализации БАС в АПК

Рекомендуется применение взвешенной суммы с экспертным определением весовых коэффициентов, адаптированных к стратегическим целям хозяйства. Применение $К_{экэ}$ 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, можно применить энергетический подход. В условиях роста цен на нефтепродукты и волатильности рынка энергоносителей энергетический подход приобретает самостоятельную ценность. Этот подход имеет практическое значение при оценке стоимости первичной продукции сельского хозяйства. Технологию производства, на примере зерновых, можно представить состоящей из пяти технологических этапов: основная обработка почвы, предпосевная обработка почвы, подготовка семян и посев, уход за растениями, уборка и последующая обработка зерна. В целом общие энергозатраты на производство зерна составляют порядка 14000 МДж/га (рисунок 2.2). Энергозатраты живого труда в операциях не превышают 30 МДж/га, т. е. около 0,2% всех затрат [52, 104].

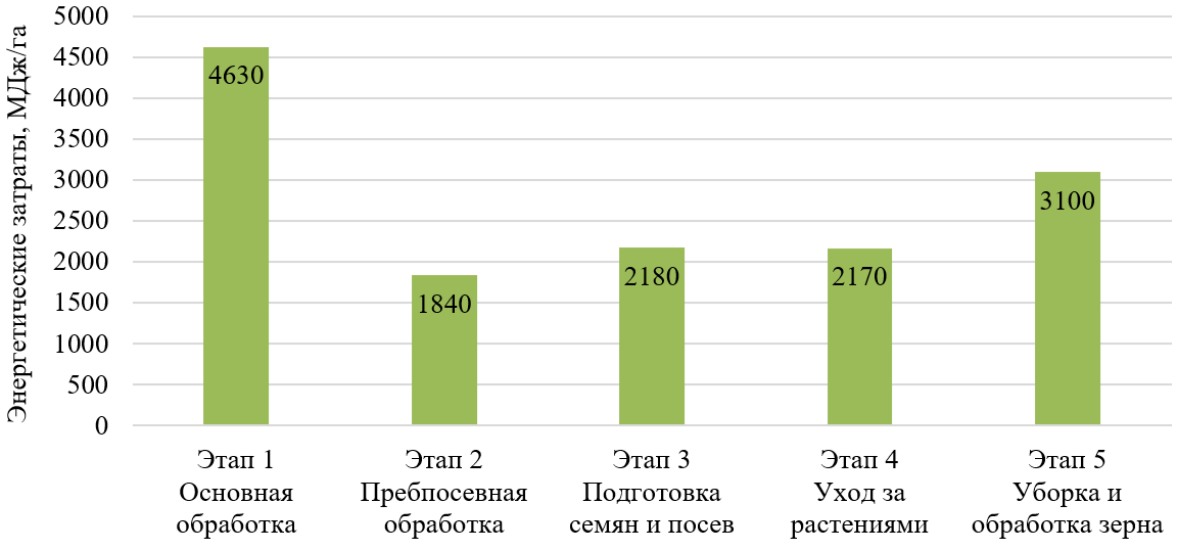


Рисунок 2.2 - Диаграмма энергозатрат по этапам возделывания пшеницы

Технология БАС может быть применена на четвертом этапе - этапе уходе за растениями. Суммарные энергозатраты по работам на этом этапе представлены на рисунке 2.3 [48, 114, 203-205].

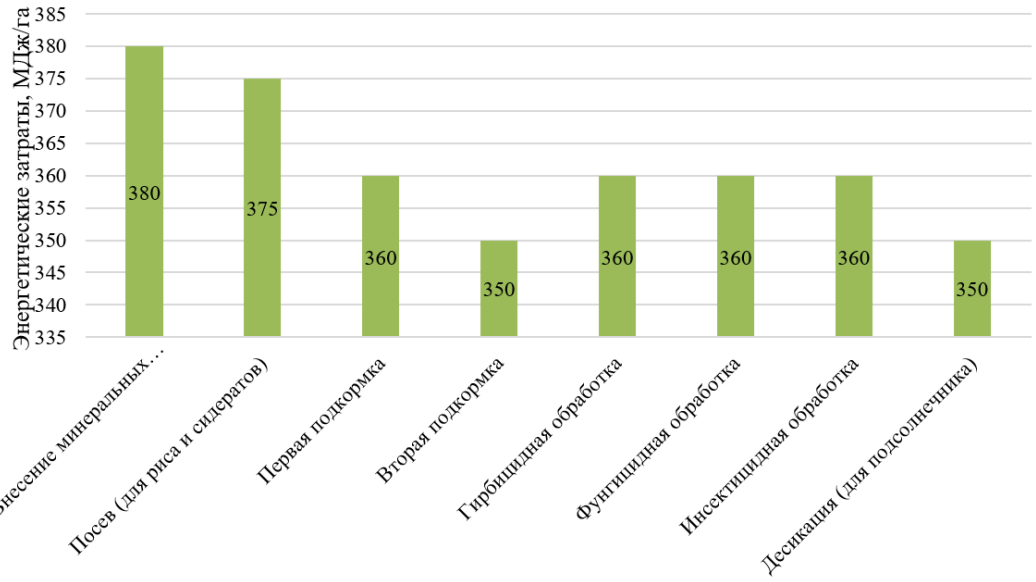


Рисунок 2.3 - График энергзатрат на этапе уходе за растениями

Сущность энергетического подхода заключается в оценке энергоэффективности использования БАС при замене традиционной технологии и сравнении отдельных БАС [40, 48, 51,73, 197]. Предлагается производить такую оценку в абсолютных и относителях показателях. В качестве абсолютного показателя энергоэффективности можно использовать удельные энергетические затраты, выраженные в МДж/га [40]:

$$E_{\text{уд}} = \frac{3{,}6 \cdot \text{P}_{\text{пот}}}{\text{W}} \qquad (2.30)$$

где $\text{P}_{\text{пот}}$ - потребляемая мощность, кВт; W – производительность агрегата, га/ч.

В качестве относительного показателя введем коэффициент энергетической эффективности $\text{К}_{\text{энэ баз}}$:

$$\text{К}_{\text{энэ баз}} = \frac{\Delta E}{E_{\text{баз}}} = \frac{E_{\text{баз}} - E_{\text{факт}}}{E_{\text{баз}}} \qquad (2.31)$$

где $E_{\text{баз}}$ – совокупные удельные энергетические затраты базовой технологии, МДж/га; $E_{\text{факт}}$ – фактические совокупные удельные энергетические затраты, МДж/га.

В случае использования традиционной технологии коэффициент энергетической эффективности может быть рассчитан:

$$К_{энэ\ ТР} = \frac{E_{баз\ ТР} - E_{факт\ ТР}}{E_{баз\ ТР}} \quad (2.32)$$

где $E_{баз\ ТР}$ –удельные энергетические затраты базовой традиционной технологии, МДж/га; $E_{факт\ ТР}$ – фактические удельные совокупные энергетические затраты традиционной технологии, МДж/га.

При замене традиционной технологии на БАС коэффициент энергетической эффективности рассчитывается по выражению:

$$К_{энэ\ БАС} = \frac{E_{баз\ ТР} - E_{сов\ БАС}}{E_{баз\ ТР}} \quad (2.33)$$

где $E_{сов\ БАС}$ - фактические совокупные удельные энергетические затраты БАС, МДж/га.

При замене традиционной машины на БАС коэффициент энергетической эффективности рассчитывается по выражению:

$$К_{энэ\ БПЛА} = \frac{E_{\ ТР} - E_{уд\ БПЛА}}{E_{\ ТР}} \quad (2.34)$$

где$E_{\ ТР}$ – удельное фактическое энергопотребление применяемой машины, МДж/га; $E_{удБПЛА}$ – удельное энергопотребление применяемого БПЛА, МДж/га.

Сравнить конкретную машину традиционной технологии для выполнения операции, непосредственно с заменяемым БПЛА можно по формуле:

$$К_{энэ} = \frac{E_{\ ТР}}{E_{уд\ БПЛА}} \quad (2.35)$$

При сравнении двух БПЛА, существующего и нового, можно воспользоваться формулой:

$$К_{энэ\ нов\ БПЛА} = \frac{E_{уд\ БПЛА} - E_{уд\ нов\ БПЛА}}{E_{уд\ БПЛА}} \quad (2.36)$$

где $E_{уд\ нов\ БПЛА}$ - удельное энергопотребление нового БПЛА, МДж/га.

При сравнении двух БАС, существующей и новой, можно воспользоваться формулой:

$$К_{энэ\ нов\ БАС} = \frac{E_{уд\ БАС} - E_{уд\ нов\ БАС}}{E_{уд\ БАС}} \quad (2.37)$$

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

Совокупные энергетические затраты традиционной технологии можно принять из справочных данных в зависимости от типа агрегатов [114, 205]. Фактические энергетические затраты по машинам могут приниматься также из справочных данных или по технологическим картам [59, 112, 48].

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

$$E_{сов\ БАС} = E_{уд\ БАС} + E_{косв} \quad (2.38)$$

где $E_{косв}$ - косвенные энергетические затраты БАС, МДж/га.

Используя энергетические эквиваленты, можно определить удельные энергетические затраты технологии БАС по формуле:

$$E_{уд\ БАС} = E_{уд\ БПЛА} + E_{зу} + E_{см\ у} + E_{перс}, \quad (2.39)$$

где $E_{зу}$ – удельные энергетические затраты зарядных устройств (дизель- и бензогенератора, электрического зарядного устройства и т.д.) МДж/га; $E_{см\ у}$ - удельные энергетические затраты смесительного узла, МДж/га; $E_{перс}$ – энергетические затраты персонала, МДж/га.

Если нагрузка БПЛА не сильно изменяется, то удельное и общее энергопотребление БПЛА $E_{уд\ БПЛА}$ можно рассчитать по формуле (2.30). Однако, например, во время проведения опрыскивания, энергопотребление будет зависеть от структуры самого полетного задания (траектории полета, метеорологических условий, конструкции БПЛА и его винтов, наполненности бака). Возможный общий вид циклограммы нагрузок во время такого полета по галсам представлен на рисунке 2.4.

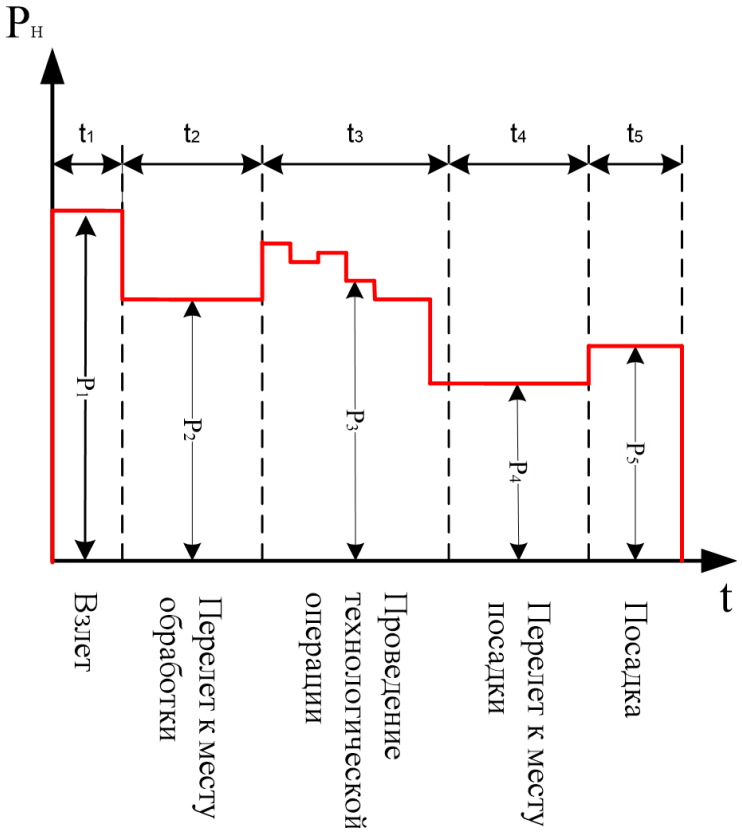


Рисунок 2.4 - Общий вид циклограммы нагрузок во время полета по галсам

Адекватно сформированное полетное задание может в значительной степени повлиять на снижение энергозатрат. Следовательно, необходимо учитывать изменение мощности на каждом участке траектории полета и время его выполнения, тогда формула расчета мощности БПЛА примет вид аналогичный эквивалентной мощности в теории расчета мощности электропривода и $P_{\text{пот}}$ будет равна $P_{\text{БПЛА экв}}$:

$$P_{\text{БПЛА экв}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m} P_{\text{пот } i}^2 \cdot t_{\text{уч } i}}{t_{\text{уч } 1} + t_{\text{уч } 2} + t_{\text{уч } 3} + \cdots + t_{\text{уч } m}}} \qquad (2.40)$$

где $P_{\text{пот } i}$ - потребляемая мощность во время полета на i-ом участке, кВт; $t_{\text{уч}}$ – время нахождения на i-м участке, ч.

Потребляемую мощность во время полета на i-ом участке можно рассчитать по формуле:

$$P_{\text{пот}\,i} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} {T_i}^3}{2\rho_{\text{в}} \cdot n \cdot S}} + P_{\text{сопр}\,i} \quad (2.41)$$

где n – количество винтов, шт; T_i – тяга i-го винта, Н; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха, принимаем 1,225 кг/м³; S – ометаемая площадь винта, м^2; $P_{\text{сопр}\,i}$ - мощность на преодоление сопротивления воздуха на i-м участке, кВт.

Тяга для поднятия БПЛА определяется по выражению:

$$T = \sqrt{F^2 + {F_{\text{сопр}}}^2} \quad (2.42)$$

где F – вес аппарата ($F = mg$, расчетная масса складывается из массы аппарата с АКБ и массы полетной нагрузки), Н; $F_{\text{сопр}}$ – сила лобового сопротивления при горизонтальном полёте, Н.

Сила лобового сопротивления $F_{\text{сопр}}$ при горизонтальном полёте может быть выражена по формуле:

$$F_{\text{сопр}} = \frac{\rho_{\text{в}} \cdot C_x \cdot S_{\text{пов}} \cdot \upsilon^2}{2} \quad (2.43)$$

где C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, о.е.; $S_{\text{пов}}$ – площадь поверхности аппарата в направлении движения, м^2; υ – скорость полета БПЛА, м/с.

Мощность на преодоление сопротивления воздуха можно рассчитать по формуле:

$$P_{\text{сопр}} = F_{\text{сопр}} \cdot \upsilon_{\text{пол}} \quad (2.44)$$

Ветер вносит два противоположных физических эффекта: он создает аэродинамическое сопротивление корпуса, но при этом может увеличивать эффективность работы винтов (эффект косого обдува). Попутный ветер увеличивает скорость полета, уменьшая затраты энергии. Встречный ветер резко увеличивает снижает скорость полета. Так как сила растет квадратично, а мощность в кубической зависимости относительно воздушной скорости, встречный ветер скоростью 5–7 м/с может поднять энергопотребление на 20-30%. При боковом ветре через винты проходит больший объем воздуха в единицу времени. Это снижает необходимую индуктивную скорость для создания той же тяги. На скоростях до 5–7 м/с встречный или боковой ветер может даже слегка

уменьшить индуктивную мощность, частично компенсируя рост паразитного сопротивления. Так как чаще всего обрабатываемое поле разбивается на параллельные линии (галсы). В конце каждой линии БПЛА тормозит, смещается на ширину захвата и снова разгоняется. Динамическая мощность на разгон требует кратковременных всплесков энергии (до максимума работы регуляторов ESC). Чем сильнее ветер, тем больше автоматике приходится компенсировать инерцию системы на разворотах. По мере опрыскивания масса БПЛА снижается от 32% до 60%, таким образом можно сделать вывод, что правильно построенное полетное задание с учетом реальных условий позволит снизить энергозатраты до 50 %.

Удельные энергетические затраты зарядных устройств определятся по формуле:

$$E_{\text{зу}} = \frac{E_{\text{удБПЛА}}}{\eta_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{сзу}}} \tag{2.45}$$

где $\eta_{\text{г}}$ – КПД дизель- и бензогенератора (справочно 0,35 для дизельгенератора и 0,25 для бензогенератора), о.е.; $\eta_{\text{сзу}}$ – КПД сетевого зарядного устройства (справочно 0,8-0,85), о.е.

Удельные энергетические затраты смесительного узла определяются по выражению:

$$\text{E}_{\text{см у}} = \frac{\text{e}_{\text{т}} \cdot Q_{\text{тгсу}}}{\eta_{\text{г}}} \tag{2.46}$$

где $\text{e}_{\text{т}}$ – энергетический эквивалент топлива (справочно 43,6) МДж/кг; $Q_{\text{тгсу}}$ – расход топлива бензоагрегата смесительного узла, кг/га.

Энергетические затраты персонала определяются по выражению:

$$E_{\text{перс}} = \text{e}_{\text{оп}} \cdot n_{\text{оп}} + \text{e}_{\text{вр}} \cdot n_{\text{вр}} + \text{e}_{\text{а}} \cdot n_{\text{а}} \tag{2.47}$$

где $\text{e}_{\text{оп}}$, $\text{e}_{\text{вр}}$, $\text{e}_{\text{а}}$– энергетический эквивалент операторов, вспомогательных рабочих и аналитиков (справочно, например, для оператора равно 1,25), 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:

$$E_{\text{косв}} = E_{\text{трансп}} + E_{\text{инфра}} \quad (2.48)$$

где $E_{\text{трансп}}$ – энергоемкость транспортировки, МДж/га; $E_{\text{инфра}}$– инфраструктурные энергозатраты, МДж/га.

При сравнении отдельных БАС транспортные энергетические затраты не учитываются. В случае сравнения с традиционной технологией энергоемкость транспортировки $E_{\text{трансп}}$ определяется:

$$E_{\text{трансп}} = e_{\text{трансп}} \cdot d \cdot m \quad (2.49)$$

где $e_{\text{трансп}}$ − удельная энергоёмкость транспорта (справочно для легкового транспорта - 2,42, для грузового транспорта - 7,11), МДж/(кг·км); d – расстояние транспортировки, км; m – удельная масса груза кг/га.

Инфраструктурные энергозатраты рассчитываются по выражению:

$$E_{\text{инфра}} = E_{\text{сервер}} + E_{\text{данные}} \quad (2.50)$$

где $E_{\text{сервер}}$ – энергозатраты на серверную обработку данных, МДж/га; $E_{\text{данные}}$ - энергия затрачиваемые на передачу данных, МДж/га.

Энергозатраты на серверную обработку данных могут быть выражены:

$$E_{\text{сервер}} = 3{,}6 \cdot P_{\text{сервер}} \cdot t_{\text{обр}} \quad (2.51)$$

где $P_{\text{сервер}}$ – мощность сервера, кВт; $t_{\text{обр}}$ − время обработки данных 1 га, ч/га.

Энергия затрачиваемая на передачу данных определяется по формуле:

$$E_{\text{данные}} = D \cdot e_{\text{передачи}} \quad (2.52)$$

где D – объём передаваемых данных, ГБ; $e_{\text{передачи}}$− удельная энергоёмкость передачи данных (справочно 0,43), МДж/ГБ·га.

В отличие от экономического анализа, где ключевую роль играют ставка дисконтирования, инфляция и рыночные риски, энергетическая оценка опирается на стабильные физические эквиваленты энергетических ресурсов и технические характеристики оборудования. Это делает ее особенно ценной на этапе сравнения альтернативных конструктивных решений БАС (электрические и гибридные, самолетного и мультироторного типа), выбора способа зарядки (сетевая электроэнергия, бензогенератор, дизель-генератор), а также формирование структуры парка БАС под конкретные агроклиматические условия. Коэффициент

энергозатрат обладает достаточной информативностью для принятия управленческих решений – по входящим компонентам показывает, за счет какого именно фактора достигнуто снижение (улучшение полетного задания, замена источника энергии, сокращение логистики, замена конструктивной схемы и т.д.).

Коэффициент $К_{энэ}$ может представлять собой относительный показатель снижения энергозатрат при переходе от традиционной технологии к технологии с применением БАС, или являться инструментом для сравнения энергетических затрат между БАС с разными характеристиками. Предложенная методика полностью работоспособна и позволяет оценивать энергоэффективность БАС так же системно, как экономическую, с идентификацией узких мест (инфраструктура, полетное задание, тип зарядного устройства).

В результате расчетов энергетической эффективности при выполнении операции «опрыскивание» отдельных БАС, расчетные значения удельных энергетических затрат и коэффициента энергетической эффективности сведены в таблицу 2.4. Относительные показатели рассчитывались для случая замены БПЛА DJI T10 на более производительные DJI T30 и DJI T40. Расчеты производились в интервалах при изменении массы и конструкции БПЛА. Производительность БАС изменялась в соответствии с паспортными данными.

Таблица 2.4 - Значения удельных энергозатрат и коэффициента энергетической эффективности для БАС DJI T10, DJI T30, DJI T40

Модель БАС	$E_{\text{уд БПЛА}}$, МДж/га	$E_{\text{зу}}$, МДж/га	$E_{\text{смy}}$, МДж/га	$E_{\text{перс БАС}}$, МДж/га	$E_{\text{уд БАС}}$, МДж/га	$K_{\text{энэ нов БПЛА}}$	$K_{\text{энэ нов БАС}}$
T10	2,13-2,97	8,89-12,39	10,17-14,53	1,25-3,75	22,44-33,65	-	-
T30	1,00-1,93	4,16-8,04	10,17-14,53	2,50-3,75	17,83-28,26	0,35-0,53	0,16-0,21
T40	0,73-1,25	3,02-5,20	10,17-14,53	2,50-3,75	16,42-24,73	0,58-0,66	0,27-0,32

Из таблицы 2.4 видно, что показатели $E_{\text{уд БПЛА}}$ и $E_{\text{уд БАС}}$ снижаются при выполнении данной операции более производительными БПЛА. Можно отметить, что $E_{\text{уд БПЛА}}$ снижаются на 66% (с 2,13 до 0,73 МДж/га), при замене DJI T10 на DJI T 40. Об этом явно говорит и растущий $K_{\text{энэ БПЛА}}$. При замене в работе DJI T10 на DJI T30 среднее значение коэффициента $K_{\text{энэ БПЛА}}$ равно 0,44, а если на DJI T40

– 0,62. При работе с DJI T10 среднее значение показателя $E_{\text{уд БАС}}$ составляет 28,05 МДж/га, а при работе с DJI T30 – 23,04 МДж/га, DJI T40 – 20,58 МДж/га. При замене DJI T10 на DJI T40 возможен рост среднего значения относительного показателя $K_{\text{энэ БАС}}$ с 0,18 до 0,27.

Также произведены расчеты по показателям энергетической эффективности в случае замены традиционной технологии опрыскивания на обработку с помощью БАС (Таблица 2.5). Таблица 2.5 не отражает инфраструктурные энергозатраты из-за малых значений (0,49-0,52 МДж/га), но они учтены в совокупных энергозатратах $E_{\text{совБАС}}$. Доля их влияния на коэффициент энергетической эффективности не значительна, но обязательно надо учитывать в расчете коэффициента экономической эффективности.

Таблица 2.5 - Значения удельных энергозатрат и коэффициента энергетической эффективности между БАС DJI T10, DJI T20, DJI T40 и традиционной технологии

Модель БАС	$E_{\text{уд БАС}}$, МДж/га	$E_{\text{трансп}}$, МДж/га	$E_{\text{косв}}$, МДж/га	$E_{\text{совБАС}}$, МДж/га	$E_{\text{ТР}}$, МДж/га	$К_{\text{энэ БАС}}$	$K_{\text{энэ}}$
T10	22,44-33,65	135-202,5	135,49-203,02	157,94-236,67	365	0,91-0,94	10,85-16,26
T30	17,83-28,26			153,32-231,28		0,92-0,95	12,92-20,47
T40	16,42-24,73			151,91-227,75		0,93-0,96	14,76-22,23

Большой вклад в косвенные энергозатраты $E_{\text{косв}}$ и соответственно в совокупные $E_{\text{совБАС}}$ вносят транспортные энергозатраты на (30–40% от общих энергетических затрат) и потери в зарядном устройстве (20–25%), влиять на них сложно. В тоже время, корректируя полетное задание под реальные условия, и как следствие, снижая $E_{\text{уд БПЛА}}$ и $E_{\text{зу}}$, можно добиться существенного повышения энергетической эффективности, следовательно, это направление является актуальным для дальнейшего исследования.

По таблице 2.5 так же видно, что любой БПЛА дает экономию в 10–16 раз по сравнению с традиционной машиной. Это объясняется тем, что традиционные опрыскиватели требуют больших расходов на топливо, амортизацию и оплату труда.

На основе предоставленной методологии выполнены расчеты для БАС DJI Phantom 4, DJI Phantom Multispectral, Mavic 2, Matrice 600 и Matrice 30T применяемых для задач мониторинга. В отличие от операции опрыскивания, при мониторинге отсутствует смесительный узел.

Производительность принята на основе паспортных данных и типовых режимов полета (высота 50–100 м, скорость 10–15 м/с, ширина захвата принималась в зависимости от характеристик камеры). Инфраструктурные затраты получены в интервале 0,50–0,55 МДж/га (аналогично таблице 2.5). Транспортные энергозатраты рассчитаны с учетом удаленности перемещения - 20 км, на легковом транспорте, полученное значение - 24,2 МДж/га (для всех БАС). Энергозатраты персонала составили – 1,25 МДж/га для всех моделей кроме БАС серии Matrice – 2,50 МДж/га.

Базовое удельное энергопотребление традиционной технологии для мониторинга принято на уровне 120 МДж/га (наземное обследование с лабораторным анализом). Значения удельных энергозатрат и коэффициента энергетической эффективности для БАС при мониторинге представлены в таблице 2.6. Значения $K_{\text{энэ нов БПЛА}}$ и $K_{\text{энэ нов БАС}}$ рассчитаны относительно более энергозатратных БПЛА и БАС соответственно.

Таблица 2.6 - Значения удельных энергозатрат и коэффициента энергетической эффективности при мониторинге

Модель БАС	$E_{\text{уд БПЛА}}$, МДж/га	$E_{\text{зу}}$, МДж/га	$E_{\text{перс БАС}}$, МДж/га	$E_{\text{уд БАС}}$, МДж/га	$K_{\text{энэ нов БПЛА}}$	$K_{\text{энэ нов БАС}}$
Phantom Multispectral	0,028–0,042	0,094–0,141	3,75	3,87–3,94	0,17–0,42	–
Phantom 4	0,012–0,015	0,040–0,050	1,25	1,30–1,32	0,75–0,79	0,66–0,67
Mavic 2	0,007–0,010	0,024–0,034	1,25	1,28–1,29	0,83–0,86	0,67–0,68
Matrice 600	0,051–0,072	0,171–0,242	2,50	2,74–2,81	–	0,28–0,30
Matrice 30T	0,032–0,042	0,108–0,141	2,50	2,64–2,68	0,17–0,42	0,31–0,33

Из таблицы 2.6 видно, что показатели $E_{\text{уд БПЛА}}$ и $E_{\text{уд БАС}}$ существенно различаются при выполнении данной операции различными БАС. Можно отметить, что $E_{\text{уд БПЛА}}$ снижается на 33–42 % (с 0,012–0,015 до 0,007–0,010 МДж/га) при замене Phantom 4 на Mavic 2, т.е. Mavic 2 в 1,5–2,1 раза экономичнее Phantom 4 по удельному энергопотреблению. Об этом явно говорит и растущий $K_{\text{энэ нов БПЛА}}$. При замене в работе Phantom 4 на Mavic 2 среднее значение коэффициента $K_{\text{энэ нов БПЛА}}$ равно 0,38. Однако при переходе к показателю $E_{\text{уд БАС}}$, учитывающему затраты на зарядку и персонал, разница между Phantom 4 и Mavic 2 становится незначительной — всего 1,5–3,0 % ($K_{\text{энэ нов БАС}}$= 0,02–0,03). Это объясняется тем, что основную долю в $E_{\text{уд БАС}}$ составляют энергетические затраты персонала (1,25–3,75 МДж/га), которые практически нивелируют различия в энергопотреблении самих аппаратов.

При работе с Phantom 4 среднее значение показателя $E_{\text{уд БАС}}$составляет 1,31 МДж/га, при работе с Mavic 2 – 1,285 МДж/га, с Matrice 30T – 2,66 МДж/га, с Matrice 600 – 2,78 МДж/га, а с Phantom Multispectral – 3,91 МДж/га. Наибольший рост относительного показателя $K_{\text{энэ нов БАС}}$наблюдается при замене Phantom 4 на Mavic 2 — положительное значение 0,02–0,03. Замена на Matrice 30T, Matrice 600 и особенно на Phantom Multispectral дает отрицательные значения $K_{\text{энэ нов БАС}}$, что свидетельствует о росте энергозатрат в 2,0–3,0 раза.

Также произведены расчеты по показателям энергетической эффективности в случае замены традиционной технологии наземного обследования на мониторинг с помощью БАС (таблица 2.7).

Таблица 2.7 - Сравнение энергетических затрат с традиционной технологией

Модель БАС	$E_{\text{уд БАС}}$, МДж/га	$E_{\text{трансп}}$, МДж/га	$E_{\text{инфра}}$, МДж/га	$E_{\text{косвБАС}}$, МДж/га	$E_{\text{совБАС}}$, МДж/га	$E_{\text{ТР}}$, МДж/га	$К_{\text{энэ БАС}}$	$K_{\text{энэ}}$
Phantom 4	1,30–1,32	24,2	0,50–0,55	24,70–24,75	26,0–26,07	120	0,783–0,789	90,9–92,3
Phantom Multispectral	3,87–3,94				28,6–28,7		0,761–0,768	30,5–31,0
Mavic 2	1,28–1,29				25,98–26,04		0,783–0,789	92,3–93,8

Модель БАС	$E_{\text{уд БАС}}$, МДж/га	$E_{\text{трансп}}$, МДж/га	$E_{\text{инфра}}$, МДж/га	$E_{\text{косвБАС}}$, МДж/га	$E_{\text{совБАС}}$, МДж/га	$E_{\text{ТР}}$, МДж/га	$К_{\text{энэ БАС}}$	$K_{\text{энэ}}$
Matrice 600	2,74–2,81				27,5–27,6		0,770–0,775	42,7–43,8
Matrice 30T	2,64–2,68				27,34–27,43		0,771–0,777	43,8–45,5

Из таблицы 2.7 видно, что все рассмотренные БАС демонстрируют высокую энергетическую эффективность по сравнению с традиционной технологией. Показатель $К_{\text{энэ БПЛА}}$ составляет 0,76–0,79, что означает снижение энергозатрат на 76–79 % при переходе от наземного обследования к мониторингу с БАС. Превышение эффективности $K_{\text{БПЛА}}$ варьируется от 30,5 (для Phantom Multispectral) до 93,8 (для Mavic 2).

Наиболее энергоэффективным является Mavic 2 с наименьшими значениями $E_{\text{совБАС}}$ (25,98–26,04 МДж/га) и максимальным $K_{\text{БПЛА}}$ = 92,3–93,8. Phantom 4 занимает второе место ($K_{\text{БПЛА}}$ = 90,9–92,3). Matrice 30T и Matrice 600 показывают средние результаты ($K_{\text{БПЛА}}$ = 42,7–45,5), что обусловлено большей массой и, как следствие, более высоким энергопотреблением и сниженной производительностью.

Наименее эффективным среди рассмотренных является Phantom Multispectral ($K_{\text{БПЛА}}$ = 30,5–31,0), что объясняется существенно более низкой производительностью (12–18 га/ч против 40–80 га/ч у Phantom 4) из-за требований к мультиспектральной съемке (снижение высоты и скорости, увеличение перекрытия). Это приводит к росту удельных затрат персонала ($E_{\text{перс БАС}}$ = 3,75 МДж/га против 1,25 МДж/га) и зарядных устройств.

Важно отметить, что транспортные затраты (24,2 МДж/га) составляют 88–93 % от совокупных энергозатрат технологии БАС, что делает логистику основным фактором, определяющим общую энергоэффективность. Инфраструктурные затраты составляют менее 2 % и не оказывают существенного влияния на итоговые показатели.

Предложенная методика оценки критериев экономической и энергетической эффективности позволяет комплексно оценить экономическую и энергетическую

эффективность внедрения БАС в сельскохозяйственное производство. Каждый критерий отражает отдельный аспект эффективности. Данная методика учитывает эксплуатационные особенности, потенциальные риски, поэтапное выполнение работ, дисконтирование, объем инвестиций, субсидирование и ставки по кредиту. Учитывается перераспределение потребности в персонале для мониторинга и внесения. Учитывается снижение потребности в ГСМ и дополнительные качественные эффекты такие как повышение точности данных, скорость получения информации, экологичность и оперативность проведения работ.

Совместное применение коэффициентов позволяет сельскохозяйственным предприятиям проводить комплексную оценку целесообразности внедрения БАС, выбирать оптимальные типы аппаратов и режимы их эксплуатации, а также формировать доказательную базу для привлечения инвестиционных ресурсов.

2.2 Обоснование методологии повышения эксплуатационной эффективности БАС

Исходя из представленных выше выводов необходимо привести внедрение БАС в цифровом земледелии к показателям эффективного использования, определяемых критериями энергетической и экономической эффективности. Для этого можно получить область оптимума между типом выполняемой операции, экономическими и энергетическими затратами, качеством проведения работ и эксплуатационными затратами [79]. Прирост урожая у при этом играет важную роль при внедрении технологии и зависит от агробиологических, конструктивных, метеорологических и химических параметров и необходимо стремиться к максимальному его значению:

$$K_{\text{у}} = f(M, B, C, K, T) \rightarrow max \qquad (2.53)$$

где M – метеорологический параметр (зависит от состояния деятельного и приземного слоев при проведении работ с БАС); B – агробиологический параметр (зависит от гидродинамических и аэродинамических процессов при обработке

технологическими растворами с помощью БАС); C – параметр мониторинга (зависит от данных аэрофотосъемки, потока ветра и агротехнологических характеристик); K – конструктивный параметр (зависит от характеристик БАС); T – электротехнологический параметр (зависит от дополнительно применяемых электротехнологических процессов).

В тоже время эксплуатации БАС представляет собой многофакторную экономико-энергетическую модель, цель которой заключается в нахождении оптимальной конфигурации БАС и режима ее работы для выполнения конкретной сельскохозяйственной операции с минимальными совокупными затратами. Отдельная целевая функция для выполнения конкретной сельскохозяйственной задачи с минимальными совокупными затратами представится в виде [85, 227]:

$$F = \alpha \cdot t_{\text{операции}} + \beta \cdot W_{\text{общ}} + \gamma \cdot \text{С}_{\text{общ}} \rightarrow min \qquad (2.54)$$

где $t_{\text{операции}}$ – время проведения операции, мин; $W_{\text{общ}}$– общая энергоемкость процесса, МДж; $\text{С}_{\text{общ}}$ – общая стоимость операции (стоимость аппарата, амортизация, эксплуатационные затраты), руб.; α, β, γ – весовые коэффициенты, отражающие важность времени, энергии и стоимости в структуре работы предприятия.

Представим интересующий объект исследования в виде системы «атмосфера–БАС–растительность», на ней отражены влияющие входные параметры (рисунок 2.1).

Для подсистемы «Атмосфера» – приземного слоя на высотах от 1 до 400 м входными параметрами являются: температура, влажность, давление, скорость и направление ветра.

Для подсистемы «БАС» входными параметрами примем количество винтов БАС и их аэродинамические свойства (размеры и шаг), масса БАС в снаряжённом состоянии, емкость АКБ, тип рабочего органа (камера, система опрыскивания, система внесения сыпучих компонентов и т.п.

Для подсистемы «Растительность» входные параметры примем: культура, для которой проводится агрономическая операция, фаза развития, тип агрономической операции, тип используемых удобрений и средств защиты растений. В свою

очередь тип культуры и ее фаза развития формируют показатель – шероховатость подстилающей поверхности, влияющий на движение воздушных масс. Исследование закономерностей изменения скорости ветра в зависимости от рельефа, типа местности и шероховатости подстилающей поверхности является необходимым при рассмотрении процессов, происходящих в системе «атмосфера–БАС–растительность» (рисунок 2.5) [103].

В качестве выходных параметров для подсистемы «БАС» рассматриваются параметры и режимы полета; для подсистемы «Растительность» – повышение качества работ, снижение энергоёмкости в растениеводстве, снижение себестоимости продукции.

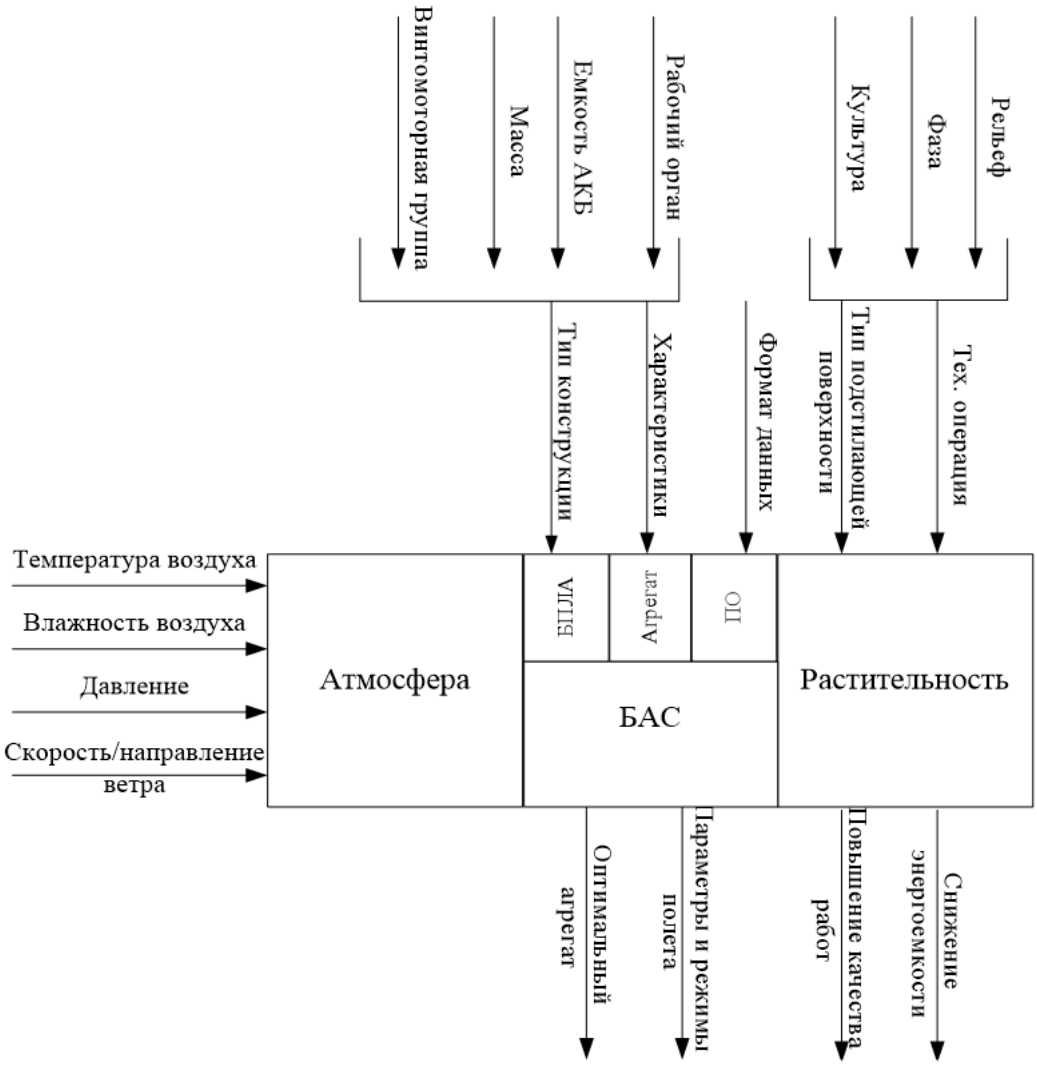


Рисунок 2.5 - Система «атмосфера–БАС–растительность»

Система «Атмосфера–БАС–Растительность» является динамической, открытой и кибернетической. Открытая, так как зависит от внешних условия

(погодные условия, задача агронома и т.д.), динамической, так как состояние окружающих параметром меняется во времени (изменение погоды, разряд АКБ, фаза роста растения), кибернетической, так как есть цель (выполнение агрооперации с заданным качеством) и управление (пилот/автопилот), необходимо учитывать обратные связи. Связи между подсистемами образуют причинно–следственные петли, определяющие успех операции.

Связь части «Атмосфера – БАС» – параметры атмосферы напрямую влияют на аэродинамику и динамику полета, встречный ветер увеличивает нагрузку на двигатели для сохранения путевой скорости, снижая время полета. Боковой ветер вызывает снос, турбулентность снижает стабильность позиционирования (критично для картографирования и точечного внесения). Температура и плотность воздуха влияют на подъемную силу винтов и эффективность охлаждения двигателей и электроники. Влажность и осадки повышают риск отказа электроники, влияют на аэродинамику винтов и налипание на рабочие органы (при опрыскивании).

Связь части «Растительность – Атмосфера» – растительный покров формирует нижний граничный слой атмосферы. Тип культуры, фаза и высота растения определяют шероховатость подстилающей поверхности, что напрямую влияет на вертикальный профиль скорости ветра (логарифмический закон). Высокая кукуруза сильно гасит ветер у поверхности и создает турбулентность. Рельеф вызывает орографические эффекты (ускорение на холмах, завихрения за препятствиями). Определяется оптимальная высота полета для равномерности внесения. Маршрут планируется с учетом преимущественного направления ветра.

Связь части «Атмосфера – Растительность» (опосредованно, через БАС) – атмосферные условия определяют, насколько точно БАС может доставить объект (СЗР, семена, данные) к растению. При этом ветер и турбулентность вызывают снос капель при опрыскивании, что приводит к снижению эффективности и фитотоксичности, неравномерности внесения сыпучих материалов, размытость изображений при аэрофотосъемке. Для опрыскивания оценивается однородность покрытия и снос. Для мониторинга – разрешение снимков, отсутствие искажений.

Связь части «БАС – Растительность» – параметры БАС определяют возможности воздействия на растительность. Тип и производительность рабочего органа (объем бака, ширина захвата камеры) определяют производительность проведения работ. Точность позиционирования (RTK/DRPK) определяет возможность точного внесения. Масса и емкость АКБ определяют длительность полета и параметры полезной нагрузки. Знание о формировании профиля ветра и данные о поведении БАС позволят реализовать оптимизирующую обратную связь. Для конкретной операции (фаза, культура, рельеф) выбирается оптимальный тип БАС (класс, мощность, система стабилизации). Для конкретного БАС и прогноза погоды определяется оптимальное время окна для полетов и строится энергоэффективный маршрут. Для конкретного поля и задачи рассчитываются оптимальные настройки (высота полета, скорость, диаметр капель для опрыскивания).

В результате анализа технологических операций и существующих методов оценки эффективности отразим требования со стороны агропромышленного комплекса для мониторинга и опрыскивания:

– агротехнический срок проведения операции;

– зоны применения технологии (степи, лесостепи, смешанных лесов, горные);

– условия проведения технологической операции (погодные факторы);

– акторы технологии (агроном, агрохимик, административный персонал, оператор БАС, геодезист, генпланист, сотрудник службы охраны);

– типы технологий по уровню интенсивности, в которых рекомендуется использовать данную операцию (экстенсивные, базовые (нормальные), интенсивные технологии, высокоинтенсивные (высокие) технологии);

– производственный процесс (культура возделывается);

– место в системе технологий и машин (мониторинг или внесение СЗР и удобрений и др.);

– назначение технологической операции (внесение посевного материла, внесение удобрений, внесение СЗР (биологических и химических), инвентаризация сельхозугодий, создание электронных карт полей, оценка объема работ и контроль

их выполнения, оперативный мониторинг состояния посевов, оценка всхожести сельскохозяйственных культур, охрана сельхозугодий);

– цель, которая может быть достигнута в результате выполнения технологической операции (получение наибольшей урожайности, сокращение до минимума затрат труда и средств, наибольший процент гибели сорной растительности и насекомых, снижение или предотвращение заболеваемости растений, повышения качества зерновой массы);

– конкретная задача, решаемая в ходе выполнения операции (внесение посевного материала, внесение гербицидов, фунгицидов, инсектицидов, десикантов, удобрений, внесение энтомофагов, создание карт–заданий для дифференцированного внесений удобрений, построение карт полей для электронного журнала агронома, построение топографических карт, планирование и межевание, планировка поверхности земель, мониторинг, охрана, сбор данных)

– способы выполнения технологической операции (ручное управление, полет в автоматическом режиме по полетному заданию, оценка состояния по мультиспектральным камерам, оценка состояния по изображениям, картирование высокой точности, картирование низкой точности, сбор данных для идентификации объекта исследования);

– требования к используемым материалам (агрегатное состояние, физические и химические свойства, параметры культуры);

– показатели качества технологической операции (процент распознанных объектов мониторинга, количество и качество растений, зоны вегетации, зоны поражения, процент гибели сорной растительности, болезней и вредителей, высокие показатели качества зерновой массы, неравномерность рельефа);

– технико-экономические показатели операции (экологическая безопасность для качества продукции и окружающей среды и срок действия исходных требований).

С целью системного внедрения БАС в сельскохозяйственное производство разрабатываются типовые исходные требования на базовые машинно-технологические операции в растениеводстве с использованием БАС. Эти требования призваны дополнить существующие нормативы с учётом специфики

применения беспилотных технологий. Основное практическое значение типовых требований заключается в их использовании как нормативного документа при разработке зональных (региональных) систем технологий и машин для растениеводства, как нормативно-рекомендательного документа для разработчиков технических заданий и производителей сельскохозяйственной техники и оборудования, включая комплексы на базе БАС, как нормативной основы для испытательных и сертификационных организаций при оценке технологий и технических средств для АПК.

Структурируем задачу оптимизации применения БАС в АПК в виде иерархической схемы. Эта задача комплексная и требует многоуровневого подхода.

Уровень 0 Стратегический

Задача: определение глобальных целей хозяйства.

Критерии оптимизации: рентабельность, урожайность, себестоимость экологичность.

└── 0.1. Агроэкономическое планирование

├── Выбор культур и севооборота

├── Формирование технологических карт

├── Бюджетирование (закупка семян, удобрений, СЗР, ГСМ)

└── Расчет целевых показателей

Уровень 1 Тактический

Задача: выбор инструментов и планирование операций.

Критерии оптимизации: эффективность выполнения задачи, стоимость операции, производительность.

└── 1.1. Выбор БАС–платформы и полезной нагрузки

├── Для мониторинга (камеры):

│ ├── мультиспектральные / гиперспектральные камеры

│ ├── тепловизионные камеры

│ └── лидары (для 3D–моделирования)

├── Для воздействия (рабочие органы):

- система опрыскивания (СЗР, жидкие удобрения)
- высевающие аппараты (посев)
- разбрасыватели твердых удобрений / гранул

1.2. Планирование миссий

- Миссия мониторинга:
  - оптимальное время/дата (фаза роста, погода)
  - маршрут, высота, перекрытие
  - цель: оценка состояния, выявление проблем
- Миссия воздействия (посев/внесение):
  - карта–задание (зоны, нормы)
  - маршрут (учет препятствий, ветра)
  - расчет грузоподъемности и количества полетов
  - календарное планирование (окна внесения)

1.3. Логистика экипажей

- Зарядные станции / пункты заправки
- Автоматизация смены батарей / заправки
- Координация нескольких БАС

Уровень 2 Данные и аналитика

Задача: преобразование сырых данных в карты внесения.

Критерии оптимизации: точность, время обработки, информативность.

2.1. Сбор и первичная обработка данных

- Выполнение мониторинга по полетному заданию
- Создание ортофотоплана, карт высот, 3D–моделей
- Радиометрическая и атмосферная коррекция

2.2. Агрономический анализ и создание карт

- Расчет вегетационных индексов (NDVI, NDRE, GNDVI и др.)
- Классификация и сегментация:
  - выделение культур/сорняков
  - определение очагов болезней и вредителей
  - выявление зон водного стресса

├── Создание карт потенциала продуктивности

└── Генерация карт–заданий для БАС

Уровень 3 Оптимизация воздействия

Задача: точечное, нормированное и эффективное проведение полевых работ.

Критерии оптимизации: точность нормы препарата, минимизация потерь, равномерность покрытия.

3.1. Оптимизация посева

├── Анализ: карты рельефа, влажности, однородности почвы.

├── Решение:

│ ├── переменная норма высева (больше – в зоны с высоким потенциалом)

│ ├── посев в труднодоступных местах (склоны, влажные почвы)

│ └── подсев (в местах пропусков)

└── Действие: БАС с высевающим аппаратом

├── Контроль нормы высева

└── Привязка к системе RTK для точности

└── 3.2. Оптимизация внесения удобрений

├── Анализ: карты вегетационных индексов, почвенное обследование.

├── Решение:

│ ├── дифференцированное внесение азотных удобрений

│ ├── локальное внесение фосфора/калия по картам почвы

│ └── листовая подкормка (микроудобрения) в критические фазы

└── Действие: БАС–распылитель или разбрасыватель

├── Расчет расхода рабочей жидкости и нормы рабочего раствора

├── Учет скорости ветра и сноса капель

└── Контроль равномерности внесения

└── 3.3. Оптимизация внесения СЗР

├── Анализ: карты сегментации (сорняки/болезни/вредители).

├── Решение:

│ ├── точечное внесение гербицидов только на очаги сорняков

│ ├── локальная обработка фунгицидами по очагам болезней

│ ├── Применение инсектицидов по данным мониторинга вредителей

│ └── внесение в поздние фазы без повреждения посевов

└── Действие: БАС–распылитель

├── Выбор типа сопел и размера капель

├── Обеспечение проникновения в нижний ярус

└── Высокая скорость работы в сжатые агротехнические сроки

Уровень 4 Валидация и обратная связь

Задача: оценка эффективности проведенных операций и корректировка моделей.

Критерии оптимизации: достижение целевых показателей.

4.1. Контроль выполнения

├── Мониторинг в реальном времени (телеметрия БАС)

├── Запись фактически внесенных норм

└── Сравнение карты–задания и карты выполнения

└── 4.2. Оценка эффективности

├── Контрольный облет через 3–7–14 дней после воздействия

├── Анализ изменений на вегетационных индексах

├── Оценка всхожести после посева, фитосанитарного состояния после внесения СЗР

└── Сравнение с данными наземного обследования

└── 4.3. Корректировка и машинное обучение

├── Обновление агрономических моделей и пороговых значений

├── Анализ данных за сезон для оптимизации на следующий год

└── Формирование базы знаний «Цифровое поле»

Получив и объединив все данные, причинно-следственная цепь, представленная в предыдущей главе, дополнится критериями эффективности и позволит проводить комплексную оценку эффективности БАС в АПК (рисунок 2.6).

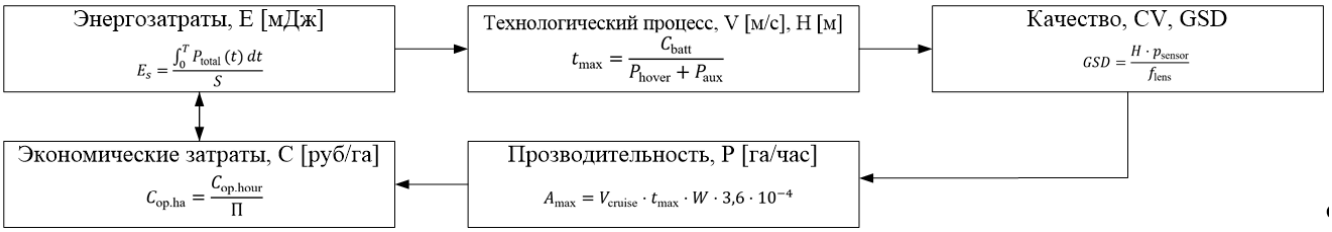


Рисунок 2.6 - Схема причинно–следственной цепи эффективной комплексной реализации БАС в цифровом земледелии с критериями эффективности

Становится возможным разработать блок-схему процесса оптимизации на основе комплексной системы критериев (рисунок 2.7).

На основе связи между подсистемами и причинно-следственной петли, определяющих успех операции, формируется обобщенный алгоритм анализа и синтеза системы (рисунок 2.8).

Расширенная схема показывает, что БАС становится центральным элементом не только мониторинга, но и исполнительным механизмом в цифровом земледелии, создавая гибкую и высокоэффективную систему управления агропроизводством [102]. Такой подход позволит перейти от эмпирического использования БАС к прецизионному, научно обоснованному и экономически эффективному управлению сельскохозяйственными операциями. Предложенная системная модель служит надежной концептуальной основой для дальнейших прикладных исследований и инженерных разработок в области цифрового сельского хозяйства, основой для формирования методологии, базирующейся на отдельных математических моделях с последующим получением средств повышения эффективности (рисунок 2.9).

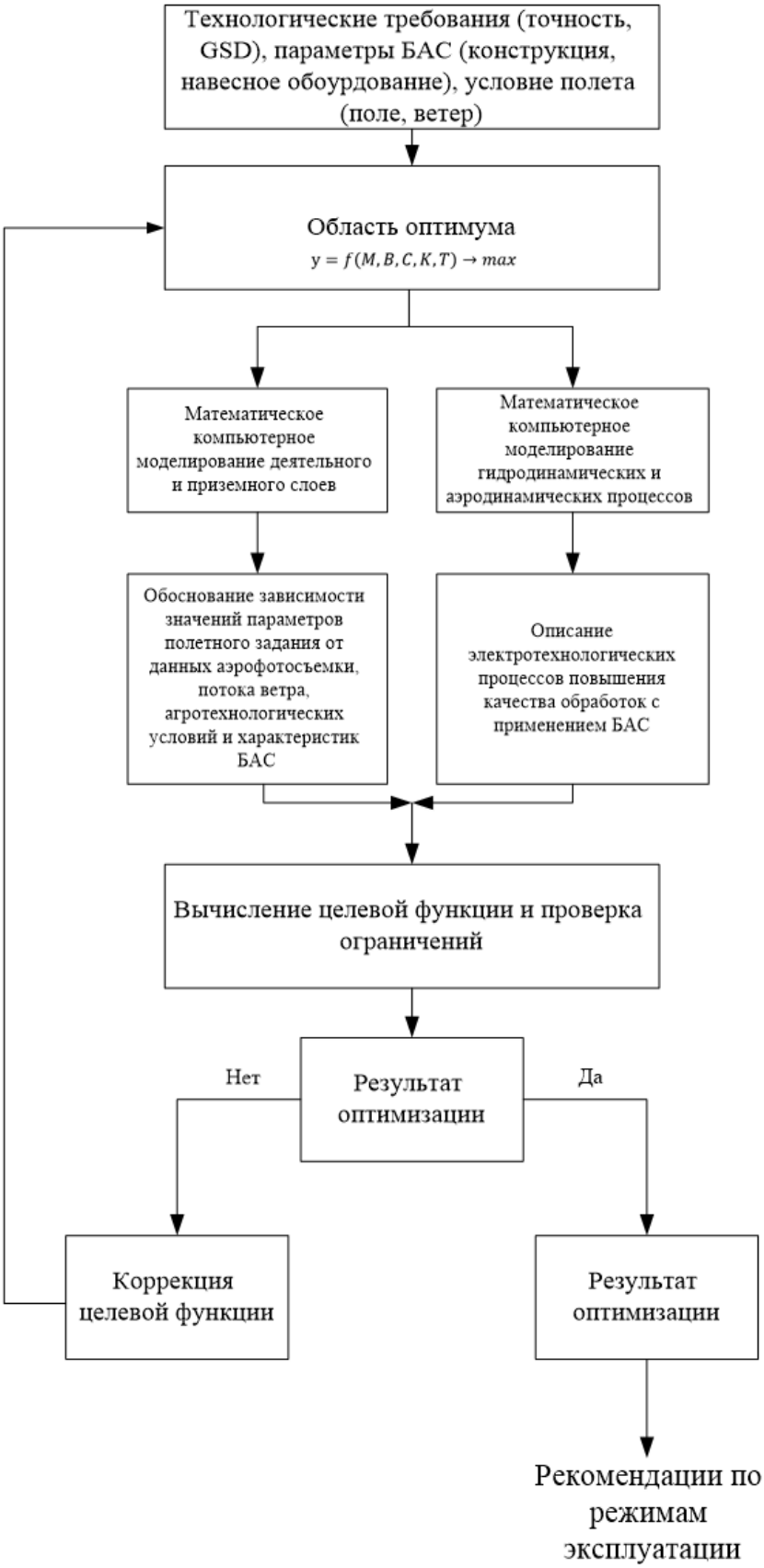


Рисунок 2.7 - Блок–схема процесса оптимизации на основе комплексной системы критериев

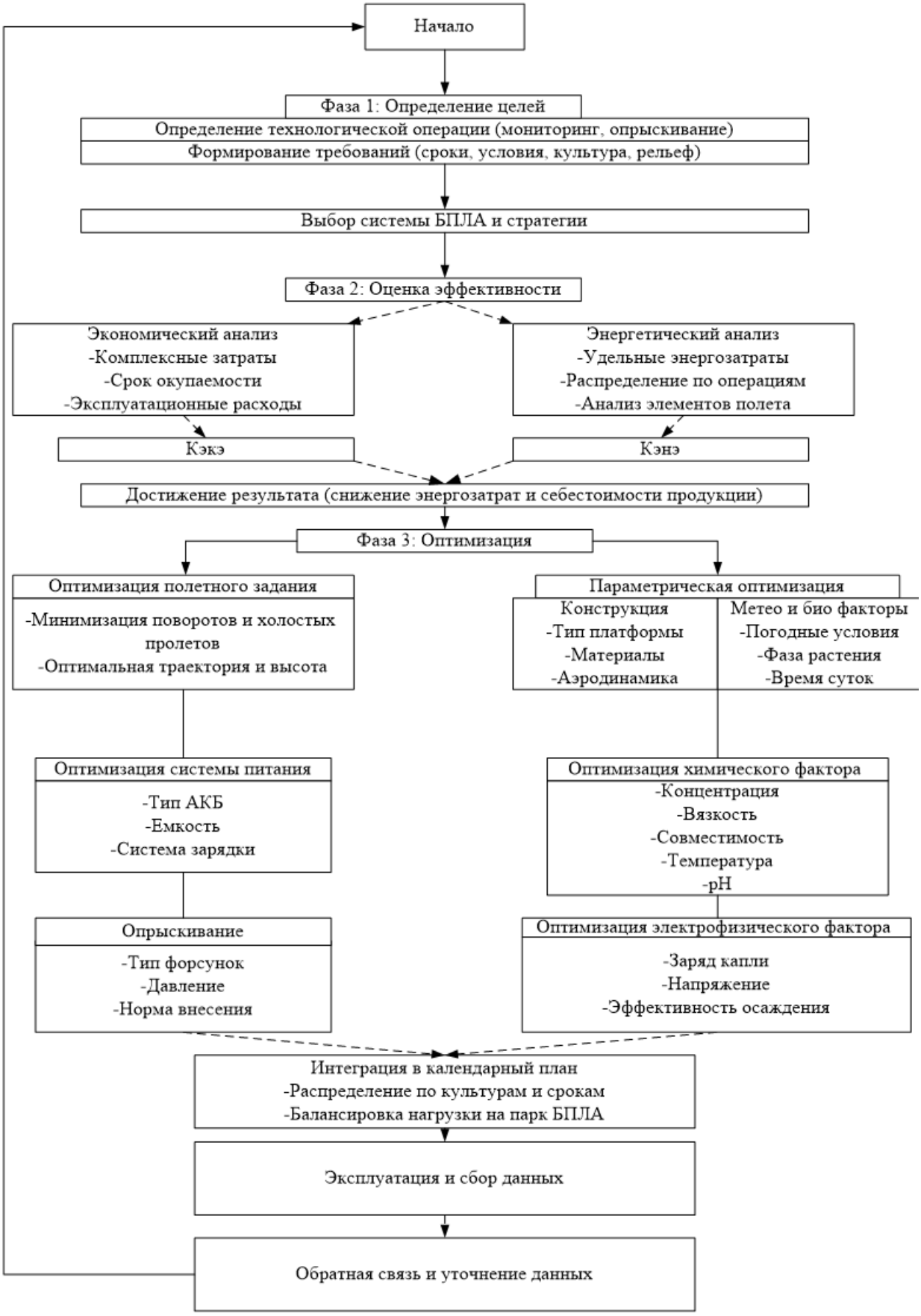


Рисунок 2.8 - Структура этапа «Данные и анализ»

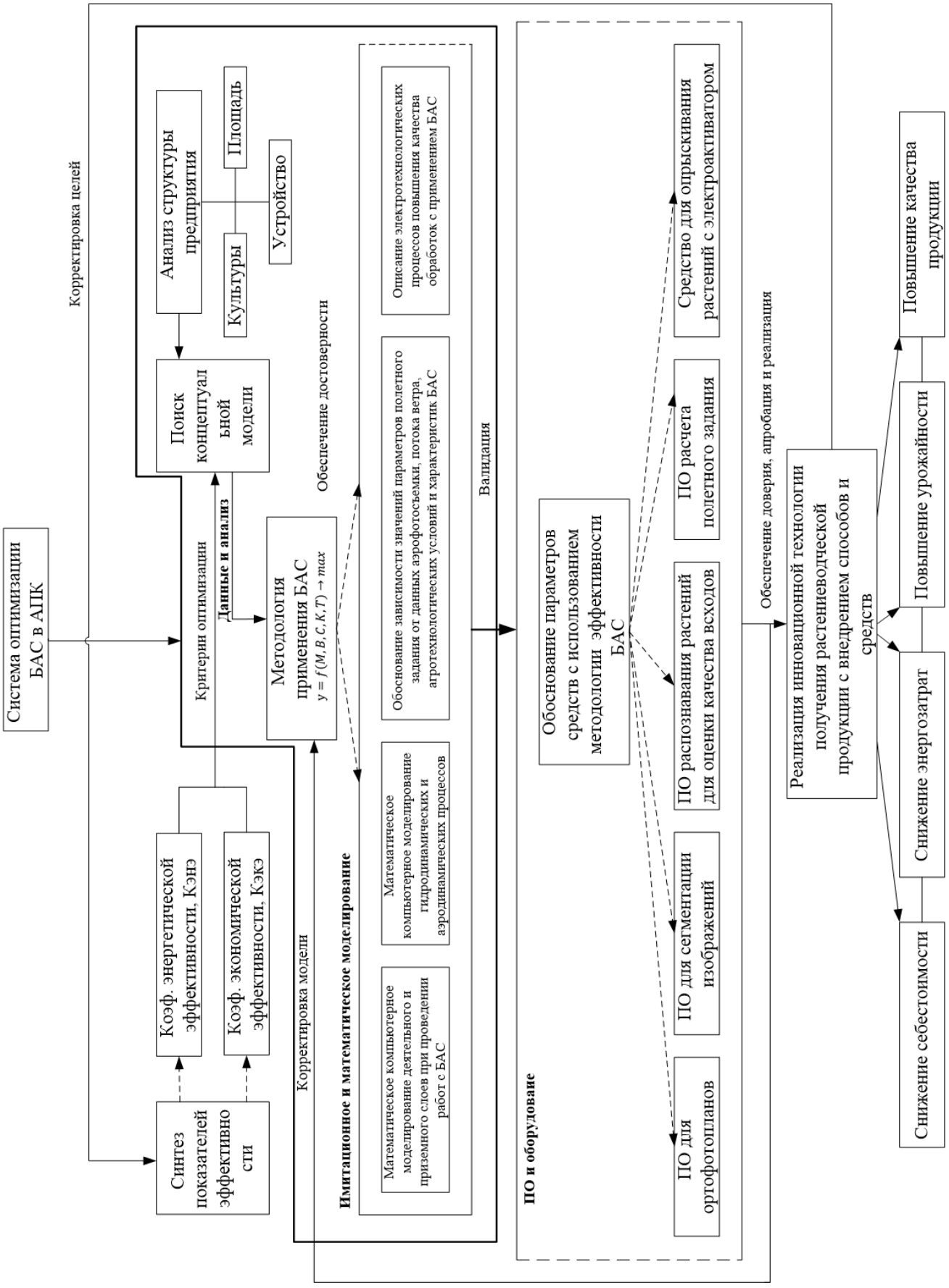


Рисунок 2.9 - Синтез системы и методология повышения эксплуатационной эффективности БАС

Для реализации преимуществ современных технологий в АПК и достижения заложенного в них потенциала необходимо обеспечить строгое соблюдение агротехнических требований на всех этапах технологической цепочки – от планирования до получения конечной продукции с заданными качественно–количественными показателями. Каждая операция с применением БАС должна быть не только четко описана, но и снабжена детальной количественной характеристикой, увязанной с возможными изменениями внешних условий. Так же необходимо разработать математические модели деятельного и приземного слоев с учетом гидродинамических, аэродинамических, и электротехнологических процессов, возникающих при выращивании сельскохозяйственной продукции с применением БАС, получить зависимость значений параметров полетного задания от данных аэрофотосъемки, потока ветра и агротехнологических характеристик, обосновать зависимость значений параметров полетного задания от характеристик электрооборудования БАС и разработать способы и электротехнологические средства повышения эффективности БАС в цифровом земледелии.

2.3 Математическое компьютерное моделирование деятельного и приземного слоев при проведении работ с БАС

На полет БПЛА сильное влияние могут оказывать различные факторы, оказывающие дестабилизирующее воздействие. Источники дестабилизирующего воздействия могут быть природного и техногенного характера, способные оказывать неблагоприятное воздействие на систему управления БАС и качество выполняемых операций. Классификацию факторов дестабилизирующего воздействия можно представить в виде схемы, представленной на рисунке 2.10 [99, 47].

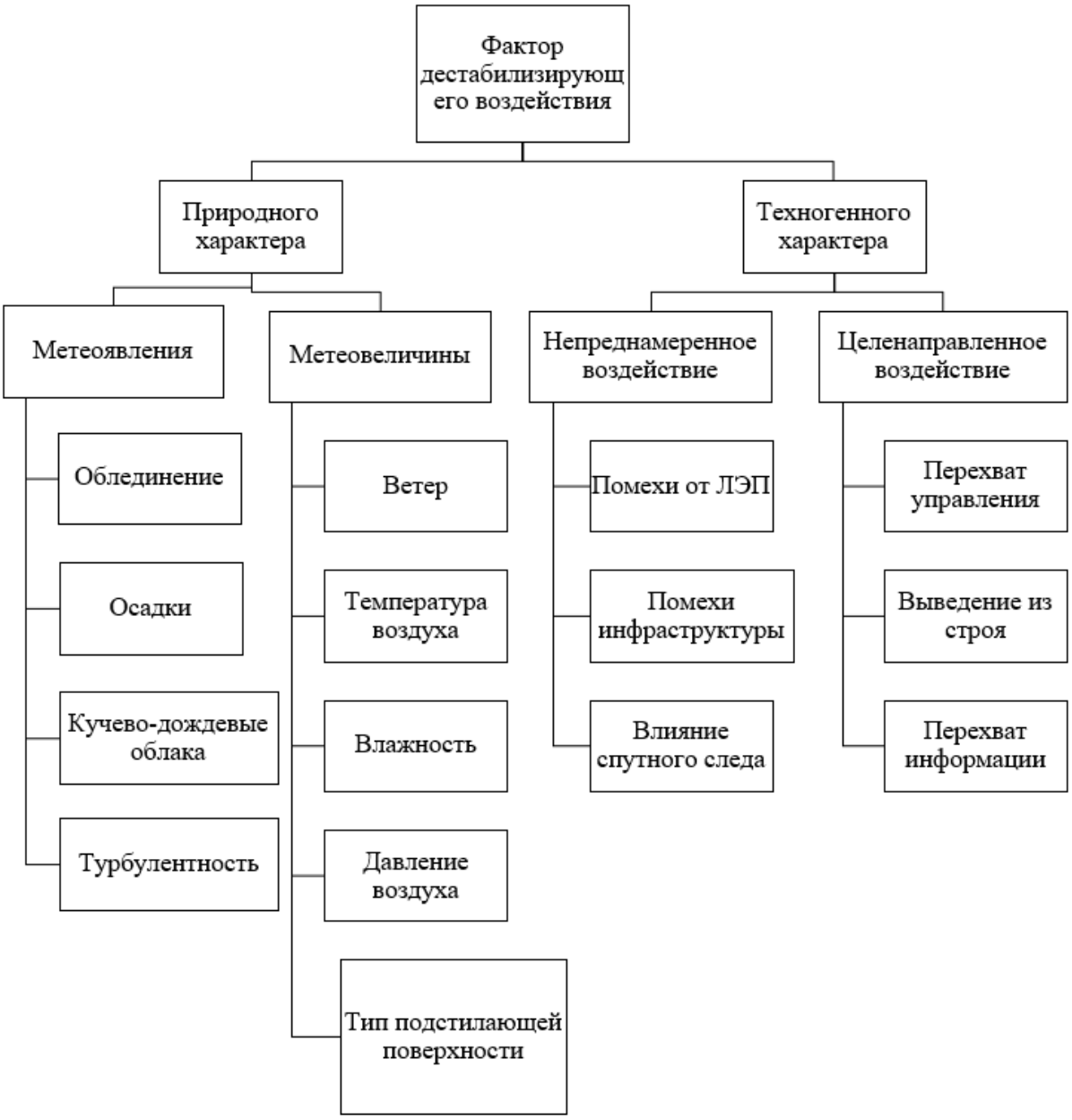


Рисунок 2.10 - Классификация факторов дестабилизирующего воздействия

Метеорологические факторы оказывают существенное влияние на взлет, посадку, полет по маршруту и выполнение технологической операции. В одних случаях это влияние благоприятное, в других – крайне нежелательное. Однако в любом случае оператору БАС перед полетом следует тщательно изучить фактические и ожидаемые значения метеорологических параметров [32, 171].

При работе с БАС следует обращать внимание на местный климат, который определяется климатообразующими факторами более мелкого масштаба:

мезорельефом, растительным массивом, микроклиматом в посевах и над посевами, учитывать поведение воздушных масс.

Подстилающая поверхность является источником механических возмущений (вследствие шероховатости поверхности), тепловых флуктуаций (из–за неравномерности нагрева поверхности) и источником поступления водяного пара (испарения с поверхности), что приводит к возникновению турбулентности и турбулентных потоков [158].

Для оптимизации полетного задания стоит также учитывать особенности теплового баланса на поверхности. Регуляция термического режима на поверхности происходит из-за поглощения и отдачи тепла путем радиации на уровне поверхности почвы и растительности. Возникает эффективное излучение – разница между собственным излучением почвы и растительности и встречным излучением атмосферы. В солнечные дни солнечная радиация как правило превышает эффективное излучение, избыток тепла в этом процессе идет на нагрев растений, почвы, прилегающие слои воздуха, биологические процессы (фотосинтез) и испарение (транспирацию). На ряду с теплооборотом большую роль играет и влагооборот – испарение влаги и конденсация в виде росы и осадков. Вместе тепло и влагооборот формируют климатические особенности приземного воздуха и верхних слоев почвы, так как вертикальные градиенты температуры и влажности в этих слоях прямо пропорциональны притоку тепла и парообразной влаги. В результате разности между собственным излучением почвы и растительности и встречным излучением атмосферы почти всегда имеет отрицательный знак, из этого следует, что в результате этого процесса поверхность теряет тепло. Солнечная радиация (R), тепло, расходуемое на испарение (транспирацию) или выделяемое при конденсации ($E_{\text{и}}$), теплообмен в почве ($T_{\text{п}}$) и тепло, поступающее от деятельной поверхности непосредственно в воздух или, наоборот, идущее из воздуха ($Q_{\text{пв}}$), в совокупности составляют, тепловой баланс деятельной поверхности – баланс потоков тепла, проходящих через эту поверхность. В общем виде, для земной (или деятельной) поверхности, уравнение теплового баланса выглядит так:

$$R = E_{\text{и}} + T_{\text{п}} + Q_{\text{пв}} \quad (2.55)$$

Скорость ветра (в частности, в приземном слое) математически не является результатом или следствием радиационного или теплового баланса. Напротив, скорость ветра выступает одним из главных факторов (воздействий), от которых зависят потоки тепла и влаги. Тем не менее, в метеорологии и гидрологии все эти процессы объединяются через уравнение теплового баланса деятельной поверхности и позволяют находить скорость ветра, если известны остальные компоненты.

Для уточнения уравнения можно включить в него приход–расход тепла, связанный с биологическими процессами: фотосинтезом, дыханием и прочими, но это количество теплоты невелико, поэтому этой величиной пренебрегаем.

Ветер напрямую влияет на интенсивность турбулентного обмена, поэтому скорость ветра на произвольной высоте может быть найдена по формуле:

$$u_n = \frac{R - E_{\text{и}} - T_{\text{п}}}{c_p \cdot \rho_{\text{в}} \cdot k \cdot (t_2 - t_1)} \quad (2.56)$$

где u_n – скорость ветра на высоте h_n, м/с; c_p – удельная теплоемкость воздуха, 0,24 кал/г град; k – коэффициент турбулентности или коэффициент турбулентной проводимости, м^2/сек; $(t_2 - t_1)$ – разница температур на двух высотах, °С.

Воздушные массы, двигаясь над неровностями поверхности, создают завихрения разных размеров. В результате этого движения одни частицы воздуха поднимаются вверх, другие наоборот – вниз. Вихреобразование происходит за счет кинетической энергии ветра и растет вместе с ней. Чем больше скорость ветра, тем интенсивнее турбулентное перемешивание [62]. В это же время параллельно с динамическим источником действует и термический, оказывающий влияние на перемещение вихрей в вертикальной плоскости. В результате совместного действия термического и динамического факторов, турбулентный обмен в дневные часы резко возрастает, причем при интенсивной термической конвекции роль ветра, как бы отступает на второй план. Это нужно учесть при вечерней обработке с БАС, рекомендованный предел температуры до 25 °С.

Солнечная радиация является основным источником энергии. Именно она определяет, будет ли днем развиваться сверхадиабатический градиент (интенсивное вертикальное перемешивание) или ночью – инверсия (застой воздуха). Солнечная радиация может быть представлена следующим образом:

$$R = (S_{\text{п}} + s_{\text{р}}) \cdot (1 - \alpha_{\text{о}}) \qquad (2.57)$$

где $S_{\text{п}}$ – прямая радиация, Вт/м²; $s_{\text{р}}$ – рассеянная радиация, Вт/м²; $\alpha_{\text{о}}$ – отражательная способность деятельной поверхности в отношении коротковолновой радиации (альбедо), о.е.

Величина альбедо является одним из крупных факторов, определяющих различия в микроклимате и местном климате, для злаковых в первые фазы развития составляет примерно 20%, а в период созревания – 25 %. Если полеты БАС (наиболее важно для качества опрыскивания) производятся в ночные часы, то отсутствует прямая и рассеянная радиация, в дневное же время, особенно в южных регионах, где преобладает солнечная погода прямая радиация является ведущей в формировании микроклимата и местного климата.

Радиационный баланс может сильно меняться от особенностей подстилающей поверхности – формы и крутизны рельефа, перепада высоты, густоты и высоты стеблестоя или стволов деревьев. Процент проникновения солнечных лучей в глубину травостоя в сильной степени зависит от его густоты, расположения и формы листвы, ее плотности, что в основном и определяет различие микроклиматов среди травяной растительности. Так, например, для пшеницы наблюдается разница суммарной радиации на разных высотах от уровня почвы (таблица 2.8), а в суточном ходе переход от отрицательного к положительному радиационному балансу и обратно наблюдается не при восходе и заходе солнца, а при высоте солнца порядка 10–15°, интервалы с интенсивным испарением – транспирацией, значительным турбулентным перемешиванием от периода с инверсией температуры, застоем воздуха, возможной конденсацией влаги в виде росы или тумана.

Таблица 2.8 - Суммарная радиация в пшенице

Высота, см	Вт/м²	%
150	0,39	100
70	0,34	86
35	0,22	57
0 (на уровне почвы)	0,1	25

С увеличением высоты местности эффективное излучение возрастает благодаря уменьшению содержания водяного пара в воздухе и ослаблению инверсии температур в ночное время и зимой. Поглощенная деятельной поверхностью лучистая энергия превращается в тепловую и передается как вглубь деятельного слоя, так и в прилегающие слои воздуха. Под деятельным слоем в данном случае понимаем слои почвы с ее растительным или искусственным покровом, в которых совершаются суточный и годовой теплообороты, определяемые суточным и годовым ходом радиационного режима. На юге России, например, преобладает ясная и солнечная погода, что приводит к большому напряжению солнечной радиации, поэтому днем господствуют сверхадиабатические градиенты, которые вызывают резкое увеличение турбулентности. В зимнее время дневная турбулентность ослабевает. Ясные летние ночи способствуют образованию температурной инверсии, что приводит к уменьшению турбулентности. Зимой же преобладание пасмурной погоды ослабевает инверсию, и, следовательно, увеличивает турбулентность.

Чем больше различается содержание водяного пара по вертикали, тем больше перенесет его с одного уровня на воздушная масса. Вся же сумма переноса зависит от массы воздуха, проходящего через единицу площади в единицу времени, эту величину можно выразить как коэффициент обмена А (таблица 2.9). Рассчитать испарение e тогда можно по формуле:

$$e = \mathrm{A} \cdot \frac{f_2 - f_1}{h_n - h_1} \qquad (2.58)$$

где e – испарение, г/м^{3}сек; А – коэффициент обмена г/м^2; $\frac{f_2-f_1}{h_n-h_1}$ – приближенный вертикальный градиент удельной влажности (при условии, что коэффициент обмена и градиент относятся к одной и той же высоте), разница влажности– $(f_2 - f_1)$ на двух высотах за интервал времени τ, %; h_n – высота, для которой производиться расчет, м; h_1 – высота, с известной скоростью ветра (как правило 1,5 м, высота установки метеостанции), м/с.

Таблица 2.9 - Значения коэффициент обмена

Характеристика	Коэффициент обмена А, г/м^2	Физический смысл для БАС
Солнечно, жарко, ветер слабый (< 2 м/с), сухая почва	0,5 – 1,5	Максимальный снос и испарение
Солнечно, ветер 2–4 м/с	0,1 – 0,5	Рабочий раствор активно перемешивается, но осаждение возможно.
Пасмурно, ветрено (>4–5 м/с), нет сильного нагрева/охлаждения	0,01 – 0,02	Капли сносит в основном горизонтально ветром, но испарение меньше.
Ясная ночь, раннее утро, туман, штиль	0,001 – 0,003	Сноса почти нет, но есть риск зависания капель

Если умножить правую чать на теплоту парообразования $d_{\text{пар}}$, то получим расход тепла на испарение $E_{\text{и}}$, кал/м^3:

$$E_{\text{и}} = \text{А} \cdot d_{\text{пар}} \cdot \frac{f_2 - f_1}{h_n - h_1} \tag{2.59}$$

где $d_{\text{пар}}$ – теплота парообразования, кал/г.

Стоит так же учесть фактор выпадения осадков в виде дождя или применение поливных машин (таблица 2.10). При выпадении осадков наблюдается поступление тепла в атмосферу и в почву и снижение температуры приземных слоев воздуха и верхних слоев почвы.

Таблица 2.10 - Температура и относительная влажность воздуха в 13 часов

Фаза	Воздух на высоте						2 м
	0,1 м			Рабочего листа			
	Без осадков	После выпадения осадков или полива	Δ	Без осадков	После выпадения осадков или полива	Δ	
Температура воздуха после полива или дождя							

Фаза	Воздух на высоте						2 м
	0,1 м			Рабочего листа			
	Без осадков	После выпадения осадков или полива	Δ	Без осадков	После выпадения осадков или полива	Δ	
Кущение–выход в трубку	24,0	22,5	1,5	23,5	22,0	1,5	22,8
Стеблевание–колошение	27,2	25,5	2,0	25,5	24,5	1,0	25,5
Относительная влажность, %							
Кущение–выход в трубку	48	62	14	48	59	11	36
Стеблевание–колошение	45	56	11	40	49	9	34

С суховеями на полях с поливными машинами температура воздуха на высоте рабочего листа ниже на 3°, а влажность выше на 15%, чем на неорошаемых участках. Благодаря тому, что на высоте 2 м и выше температура воздуха определяется не только местным режимом, но и притоком тепла с соседних не орошённых участков (местная адвекция), то последняя в ряде случаев оказывается выше температуры в травостое. С практической точки зрения это означает, что на орошенных полях часто и в дневные часы наблюдается инверсия температуры, а следовательно, и ослабленная турбулентность.

Зависимость теплообмена в почве от скорости ветра является следствием единства теплового баланса деятельной поверхности. Увеличение скорости ветра вызывает рост теплообмена почва–воздух за счет теплообмена в самой почве.

При передаче тепла в почву тепловой поток определяется двумя факторами: градиентом температуры и теплопроводностью почвы. Чем больше разность температур поверхности и более глубоких слоев, тем большее количество тепла поступит в почву или, наоборот, уйдет из нее.

В таком случае расчет теплового потока вглубь почвы можно произвести следующим образом:

$$T_{\text{п}} = \Theta \cdot \frac{t_{\text{п}2} - t_{\text{п}1}}{z_2 - z_1} \qquad (2.60)$$

где $T_{\text{п}}$– тепловой поток кал/м^2; $\frac{t_{\text{п}2}-t_{\text{п}1}}{z_2-z_1}$ – вертикальный температурный градиент, разница температур – $(t_{\text{п}2} - t_{\text{п}1})$ на двух глубинах за интервал времени τ, К; $z_2 - z_1$ – разность глубин, м; Θ – температуропроводность, м^2/сек.

Вычислить коэффициент температуропроводности можно по графику (рисунок 2.11) или по формуле:

$$\Theta = \left[\frac{0{,}43 \cdot (z_2 - z_1)}{lgA_0 - lgA_z}\right]^2 \cdot \xi \qquad (2.61)$$

где A_0 и A_z – соответствующие амплитуды температуры, ξ – постоянный множитель, о.е. ($0{,}36 \cdot 10^{-4}$ – суточное значение, $0{,}99 \cdot 10^{-7}$ – годовое).

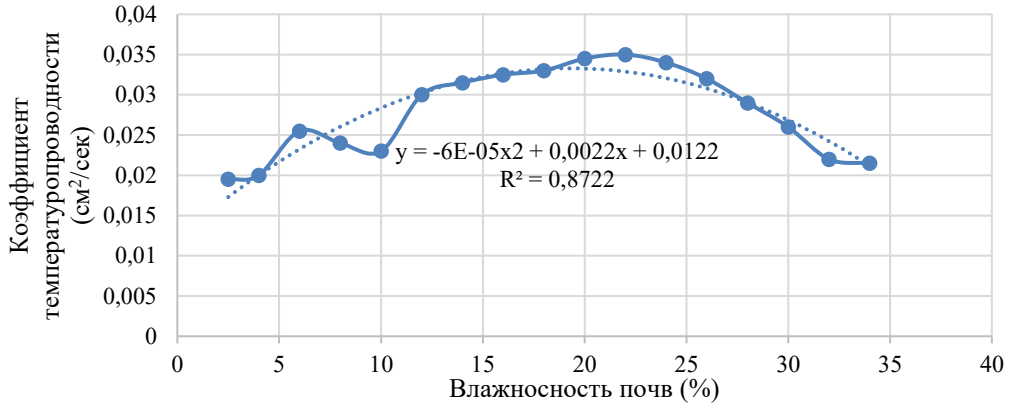


Рисунок 2.11 - График определения коэффициента температуропроводности почвы

Передачу тепла из почвы в воздух $Q_{\text{пв}}$ можно выразить следующей формулой:

$$Q_{\text{пв}} = c_p \cdot \rho_{\text{в}} \cdot k \cdot \frac{t_2 - t_1}{z_2 - z_1} \qquad (2.62)$$

Для расчета коэффициента турбулентности можно воспользоваться методом Д.Л. Лайхтмана:

$$k = \beta \cdot u_n \cdot h_n^{1-\theta} \qquad (2.63)$$

где β – коэффициент, определяется по изменению скорости ветра с высотой, зависит от термической стратификации и шероховатости (0,1 – 0,4); u_n – скорость ветра на расчетной высоте, м/сек; θ – коэффициент, зависящий от скорости ветра, термической стратификации и шероховатости подстилающей поверхности, а также определяемый по изменению скорости ветра с высотой, о.е. (таблица 2.11).

Таблица 2.11 - Значения θ для различных условий

Условия	θ, о.е.
Ясный день, сухая почва, ветер < 2 м/с	–0,3 … –0,5
Ясный день, влажная почва, ветер < 2 м/с	–0,1 … –0,2
Пасмурно, ветер 2–4 м/с	0 … 0,05
Ясная ночь, инверсия, ветер < 2 м/с	0,2 … 0,4
Ночь, пасмурно	0,05 … 0,15
Сильный ветер (> 5 м/с)	0

Значение θ зависит от разности температур Δt на высотах, которую можно вычислить по данным метеостанции: $\Delta t < 0$ (дневной сверхадиабатический градиент), θ – отрицательный ($\approx -0{,}2$ и ниже), профиль ветра более пологий, турбулентный обмен сильный, ветер на высоте 1–2 м близок к ветру на больших высотах; $\Delta t = 0$ (равновесное состояние, пасмурно, ветрено): $\theta = 0$, профиль ветра логарифмический; $\Delta t > 0$ (ночная и утренняя инверсия): θ – положительные значения (>0,2). Профиль ветра сильно искривлен. Скорость у земли резко падает. Это критически важно для опрыскивания в утренние часы.

Исследование закономерностей изменения скорости ветра в зависимости от рельефа, типа местности и шероховатости подстилающей поверхности является необходимым при рассмотрении процессов, происходящих в системе «атмосфера–БАС–растительность». Расчеты изменения скорости ветра с выстой в пасмурную ветреную погоду, т. е. при равновесном состоянии, можно производить по логарифмической формуле:

$$u_n = u_1 \cdot \frac{lgh_n - lgz_0}{lgh_1 - lgz_0} \tag{2.64}$$

где u_1 – известная скорость на высоте h_1, м/с; z_0 – показатель шероховатости подстилающей поверхности, м.

Зная скорость ветра на двух высотах z_0 можно выразить по выражению:

$$lgz_0 = \frac{lgh_n - \frac{u_n}{u_1} lgh_1}{1 - \frac{u_n}{u_1}} \tag{2.65}$$

По собранным данным с метеостанций ясно, что на открытом ровном месте с травостоем z_0 колеблется в зависимости от высоты травы в пределах от 1 до 5 см (таблица 2.12). Оголенная от растительности и гладкая поверхность почвы

характеризуется z_0 = 0,01 м. Согласно литературным источникам [103, 111, 162], шероховатость z_0 зависит от площади поверхности с растительным покровом (определяется индексом LAI). Когда растительный покров отсутствует (LAI=0), профиль ветра определяется только шероховатостью (z_0=0,002 м). В слое растительности скорость ветра быстро затухает. В плотных растительных сообществах, например, когда LAI ≥ 5 движение воздуха практически отсутствует. Например, если растительный покров высотой 0,03 м≤ $h_{рп}$ ≤ 0,6 м имеет листовой индекс 1,5≤LAI≤7, то уровень шероховатости будет находиться в пределах 0,05 м ≤$Z_{0рп}$ ≤0,09м над верхней границей растительного покрова, где отсутствуют какие–либо препятствия [71, 100].

Таблица 2.12 - Показатель шероховатости подстилающей поверхности полученный опытным путем

Тип подстилающей поверхности	z_0, м
Почва	0,01
Пшеница в фазе кущения	0,03
Пшеница в фазе выхода в трубку	0,035
Пшеница в фазе колошения	0,05
Кукуруза в всходы	0,1
Кукуруза в развитие листьев	0,7
Кукуруза в формирование зерна	0,25–0,5
Подсолнечник в фазе 1 пара настоящих листьев	0,02
Подсолнечник в фазе 2 пара настоящих листьев	0,04
Подсолнечник в цветение	0,27–0,3
Свекла, картофель, сомкнутая ботва	0,05–0,15
Разнотравье	0,04–0,15

В приземных слоях на произвольной высоте профиль ветра с хорошей точность определяется по выражению [28, 103, 110, 151]:

$$u_n = u_1 \cdot (\frac{h_n}{h_1})^{\theta} \qquad (2.66)$$

Скорость ветра над поверхностью при переходе от 1–10 метров может увеличиться – в 5 раз. В слое шероховатости профиль ветра деформируется, скорость ветра безусловно меняется в зависимости от термической стратификации приземных слоев воздуха. Если днем при сверхадиабатических градиентах

отклонение вертикального профиля скоростей ветра от логарифмического сравнительно незначительно, то ночью при инверсии оно достаточно велико. Сопоставление дневных и ночных скоростей ветра дает возможность судить о суточной амплитуде скорости ветра. На высоте 0,5 м различие между дневной и ночной скоростью ветра в летние месяцы превышает 1,5 м/сек. Зимой суточная амплитуда превышает 0,1–0,3 м/сек. Важно подчеркнуть, что в приземном слое воздуха суточная амплитуда скорости ветра в теплое время года больше ее годовой амплитуды. Поэтому если в дневные часы можно для расчета изменения ветра по вертикали в первом приближении пользоваться логарифмической формулой (2.72), то для ночных часов лучше воспользоваться формулой Д.Л. Лайхтмана учитывающей вертикальный профиль ветра для открытых ровных участков:

$$u_n = u_1 \cdot \frac{h_n^\theta - z_0^\theta}{h_1^\theta - z_0^\theta} \tag{2.67}$$

Данная формула удобна для интер– и экстраполяции результатов непосредственных наблюдений над скоростью ветра в двух точках на высоте до 30 метров.

Получена система уравнений M, описывающая метеорологический параметр деятельного и приземного слоев при проведении работ с БАС, позволяющая определить скорость ветра на высотах от 2х до 300 метров в зависимости величины солнечной радиации, тепло– и влаго– переноса для различных культур и их фаз развития:

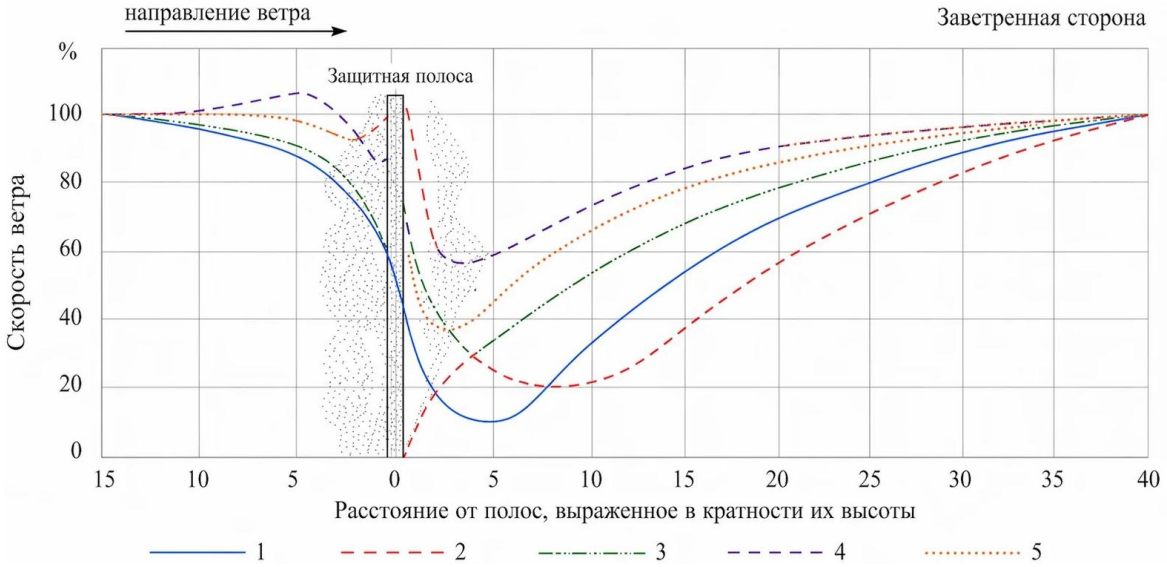
$$M = \begin{cases} u_n = \dfrac{R - E_{\text{и}} - T_{\text{п}}}{c_p \cdot \rho_{\text{в}} \cdot k \cdot (t_2 - t_1)} \\ R = (S_{\text{п}} + s_{\text{р}}) \cdot (1 - \alpha_{\text{о}}) \\ E_{\text{и}} = \text{А} \cdot d_{\text{пар}} \cdot \dfrac{f_2 - f_1}{h_n - h_1} \\ T_{\text{п}} = \Theta \cdot \dfrac{t_2 - t_1}{z_2 - z_1} \\ Q_{\text{пв}} = c_p \cdot \rho_{\text{в}} \cdot k \cdot \dfrac{t_2 - t_1}{z_2 - z_1} \\ u_n = u_1 \cdot \left(\dfrac{h_n}{h_1}\right)^\theta ;\ h_n = 2 \div 10, 15 \div 150 \\ u_n = u_1 \cdot \dfrac{h_n^\theta - z_0^\theta}{h_1^\theta - z_0^\theta};\ u_n \le 5 \end{cases} \tag{2.68}$$

Исходя из выше сказанного следует важный с практической точки зрения вывод, что вертикальная зональность скорости ветра в нижнем 10–метровом слое – факт вполне реальный, и с ним необходимо считаться как в теоретических задачах, так и в практической деятельности сельскохозяйственного производства при проведении работ по опрыскиванию с применяем БАС, а свойства слоя высотой от 50 до 400 метров учитывать для работ по мониторингу и картированию. Необходимо так же учитывать, что, соотношения скоростей ветра на разных высотах в дневные часы сравнительно устойчивы и увеличиваются при увеличении скорости ветра. Поэтому, хотя увеличение средних скоростей ветра при переходе от 1–2–метрового слоя к 5–10–метровому от 3 до 4,5 м/сек, т. е. в 1,5 раза, может не показаться существенным, но оно означает, когда на высоте 5–10 м скорость будет равна 20 м/сек, в слое 1–2 м она будет всего 13 м/сек. До 2 м скорость медленно увеличивается с высотой, но начиная с 2 м, ситуация меняется – скорость ветра увеличивается значительно быстрее и увеличение идет настолько быстро, что уже на высоте порядка 50–100 м ночные скорости больше дневных. Локальные особенности рельефа и растительности (лесополосы, овраги) оказывают максимальное влияние в нижнем 10–метровом слое, что требует от оператора БАС в режиме опрыскивания учитывать эти особенности рельефа не только как физические объекты, но и как факторы, деформирующие воздушный поток.

Для определения параметров полета БАС при небольших скоростях и высотах стоит учитывать сезонное состояние лесополос, и соответственно, градиент площади в зависимости от наличия листьев, а также расстояние между лесополосами. Структура лесополос оказывает значимое влияние на скорость ветра (рисунок 2.12). В крупных просветах между деревьями скорость ветра может быть такая же, как и в степи за счет уменьшения площади поперечного сечения воздушного (таблица 2.13). Основные (продольные) лесные полосы ориентируют перпендикулярно господствующим вредоносным ветрам с отклонением не более 30°.

Таблица 2.13 - Зависимость скорости ветра от угла набегания на лесополосу

Средний угол набегания на лесополосу	Скорость ветра в % от скорости в средней части поля между полосами) в зависимости от расстояния полосы, м								
	10	30	100	200	425	200	100	30	10
79	11	27	66	92	100	104	98	89	80
56	12	30	71	93	100	102	98	85	85
34	14	45	81	96	100	105	93	87	87
11	30	61	89	95	100	99	94	86	86



1 – ажурная снизу, густая сверху, 2 – ажурная сверху, редкая снизу, 3 – густая сверху и снизу, 4 – редкая сверху и снизу, 5 – густая шириной 200 м

Рисунок 2.12 - Влияние лесополос на скорость ветра

Для определения оптимального полетного задания, для опрыскивания или разбрасывания в границах поля, разработана компьютерная модель движения воздушных потоков от лесополос в программной среде COMSOL Multiphysics [66]. Модель учитывает различные конструкции лесополос путем применения коэффициента пористости среды, расстояние между лесополосами, скорость и направление ветра, набегающего на лесополосу, температуру и влажность воздуха во время проведения работ (весенние и летние обработки сильно отличаются по метеоусловиям), перепад высот рельефа. Тип и фаза культуры (плотность и высота) будет влиять на коэффициент шероховатости.

Лесополоса моделируется как пористая среда (с заданной толщиной и высотой). Ветровой поток рассматривается в 2D области с лесополосой и

прилегающей территорией. Расстояние между лесополосами учитывается в размерах расчетной области. Используем уплотнение сетки объекта моделирования в зоне лесополосы и пограничного слоя (рисунок 2.13). Зона лесополосы (пористая среда) – мелкая сетка, высокое разрешение необходимо для учета турбулентности и потерь давления, размер ячеек: 0,1–0,5 м (зависит от густоты посадки). Приземный слой (нижние 2–5 м) – уплотненная сетка, учет шероховатости поверхности и пограничного слоя, размер ячеек: 0,05–0,2 м. Остальная область – крупная сетка, постепенное увеличение размера ячеек от 1 м до 5 м.

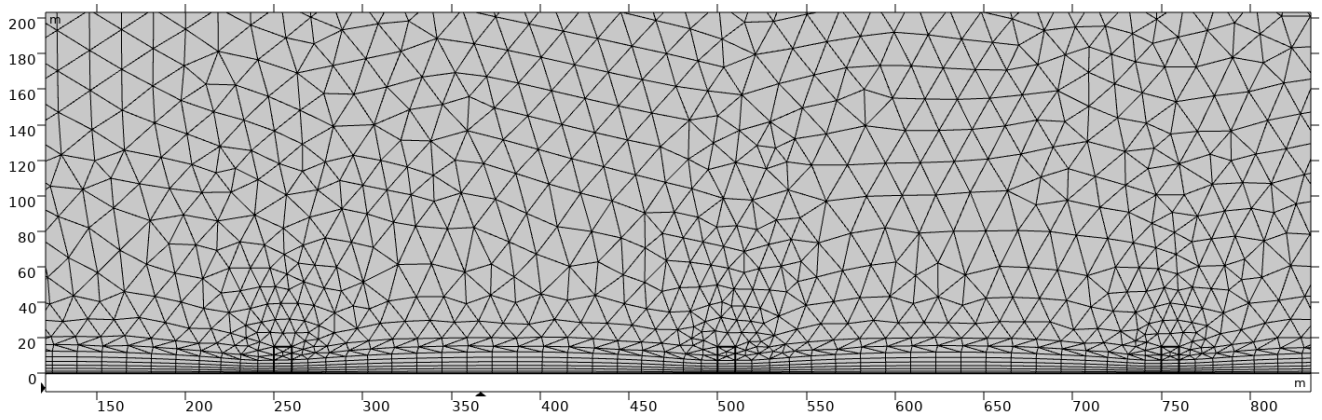


Рисунок 2.13 - Построенная расчетная сетка структуры лесополос по геометрической модели

Граничные условия: вход (inlet) – задается скорость и направление ветра (Uwind, угол атаки), температура и влажность (разные для весны и лета); выход (outlet) – условие нулевого давления. Лесополоса принимается как пористая среда, пористость задается коэффициентами α_c и β_c (зависит от конструкции лесополосы). Шероховатость поверхности задается условием прилипания (no–slip) или скольжения (slip). Результаты моделирования представлены на рисунка 2.14-2.16.

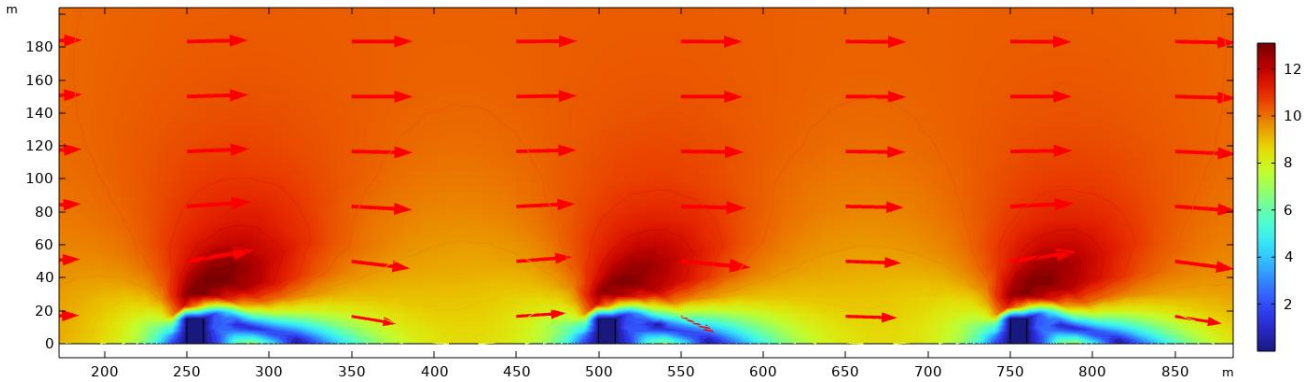


Рисунок 2.14 - Изображение результата моделирования распространения ветра между лесополосами при скорости 10 м/с

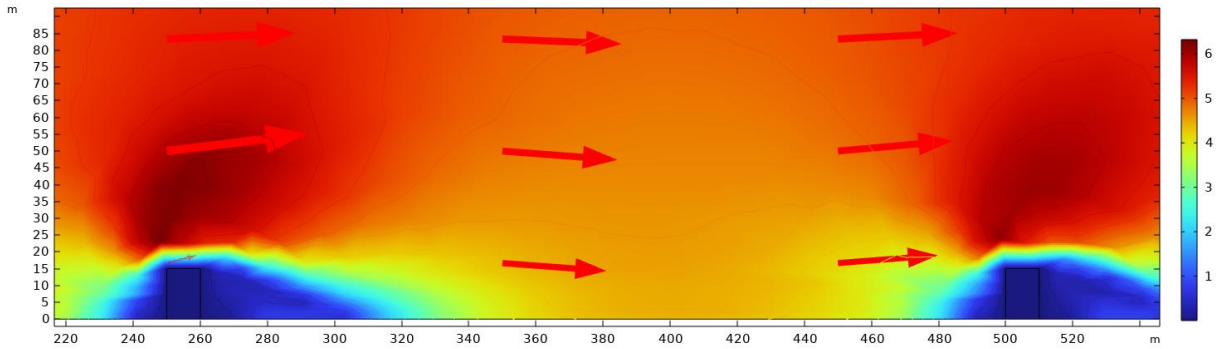


Рисунок 2.15 - Изображение результата моделирования распространения ветра между лесополосами при скорости 5 м/с

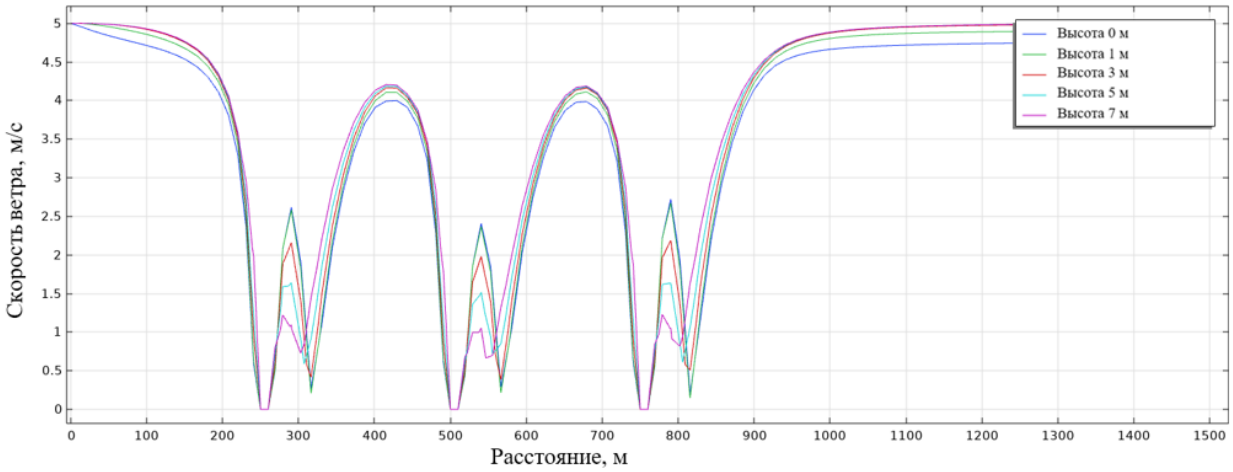


Рисунок 2.16 - График распределения скорости ветра на разных высотах при скорости набегающего потока 5 м/с

Полученная компьютерная модель позволяет, меняя начальные условия, определять скорость и направление ветра в различных участках поля, удаленных от лесополос. 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 урожайность. Оператору можно предложить следующие рекомендации для проведения опрыскивания: на расстоянии 50 м от лесополосы наблюдается снижение скорости ветра, для обработки высота может быть в диапазоне 1–7 м, скорость полета –до 5–10 м/с. В интервале 50–70 м рекомендуется увеличить скорость обработки до 12 м/с, не снижая высоты. В интервале 70 – 230 м от лесополосы, при той же скорости обработки, снизить высоту до 3–5 метров. На крайнем интервале 230–250 м вернуться в первоначальный режим.

2.4 Математическое компьютерное моделирование гидродинамических и аэродинамических процессов при обработке технологическими растворами с помощью БАС

Преимуществом внесения химических препаратов с БАС является эффект отражения воздушных потоков и нанесение препарата на нижнюю сторону листа. Турбулентность от вихрей заставляет листья колебаться, это позволяет каплям попасть не только на верхнюю поверхность (адаксиальную), но и на нижнюю сторону листа (абаксиальную), где часто прячутся вредители и болезни. Без этих вихрей (например, при ручном опрыскивании или наземной техникой) нижняя часть густых растений часто остается сухой. Скоростной воздушный поток от лопастей БАС играет положительную роль – принудительного инерционного осаждения, но в то же время ускоряет процесс испарения капли. Необходимо предложить методику расчёта параметров процесса распыления рабочих жидкостей, так и эффективного последующего осаждения мелких капель при УМО

на целевых объектах. Расчёты по такой методике позволят предварительно определить удовлетворяющую требованиям практики конструкцию распылителя, БПЛА и выбрать оптимальные условия процесса опрыскивания [23, 74, 199].

Качество опрыскивания с БПЛА зависит от ряда факторов: температуры, влажности, скорости ветра, нормы расхода рабочего раствора, скорости полета, высоты полета и связанной с ней шириной захвата. Самая высокая эффективность внесения пестицидов при температуре от +10 до +20 °С и влажности 65–90 % в утренние часы с 5 до 11 часов, потом она снижается с 11 до 15 часов примерно вдвое, повышается к 17 часам и после 19 часов приближается по эффективности к утренней, но не достигает ее. Эти закономерности действуют, если температура не превышает +25 °С.

При опрыскивании растений применяют водные растворы пестицидных препаратов. Содержащаяся вода в каплях быстро испаряется даже при благоприятных метеоусловиях (t=15°С, W =60%), при этом размер капли резко сокращается, и образуется капля с высокой остаточной концентрацией пестицида. Такие капли легко подвержены сносу и могут уноситься ветром на большие расстояния. Если рассмотреть процесс движения капли при УМО, то ясно, что они будут двигаться в приземном слое атмосферы относительно воздуха, хотя и медленно из-за малых размеров. При этом движении наблюдается возрастание интенсивности испарения на передней поверхности капли, которое будет скомпенсировано уменьшением скорости испарения на задней поверхности. В этом случае, для расчета времени испарения $t_{\text{искап}}$, возможно применить формулу Максвелла с учетом индуктивного потока от несущих винтов:

$$t_{\text{искап}} = \frac{\rho_{\text{ж}} \cdot ({d_{\text{к}}}^2 - d_{\text{П}}^2)}{8 \cdot \psi \cdot (C_0 - C_\infty) \cdot \left[2 + 0{,}6\sqrt{\frac{d_{\text{к}} \cdot v_i}{u_n}} \cdot \sqrt[3]{\frac{u_n}{\psi}}\right]} \qquad (2.69)$$

где $t_{\text{искап}}$ – время испарения капли, с; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность частицы, кг/м^3; $d_{\text{к}}$ – первоначальный размер капли водного раствора, м; $d_{\text{П}}$ – диаметр капли препарата после испарения из нее воды, м; ψ – коэффициент диффузии водных паров в воздухе, см^2/с (ψ =2,2·10^{-5} м^2/с при $p_0 = 1$ атм и t =0°С); C_0 – концентрация

насыщенного водяного пара у поверхности капли при температуре воздуха равной температуре испарения капли, г/см^3 (C_0=1,2·10^{-2} кг/м^3 при t=20°С; C_0 =2,3·10^{-2} кг/м^3 при t =25°С); C_∞ – концентрация водяного пара в окружающем воздухе при относительной влажности и той же температуре испарения капли, г/м^3.

Средний размер капель $d_к$ устанавливается типом форсунки или регулируется частотой вращения распылителя (атомайзера) и может быть выражен по формуле [163]:

$$d_к = \frac{23 \cdot 10^{-4}}{n_р} \sqrt{\frac{\sigma_ж}{R_р \rho_ж}} \tag{2.70}$$

где $\nu_р$ – частота вращения распылителя, об/с; $\sigma_ж$ – поверхностное натяжение жидкости (0,02–0,07), Н/м; $R_р$ – радиус распылителя, м.

Концентрация (плотность) водяного пара в окружающем воздухе может быть найдена по выражению:

$$C_\infty = \frac{W \cdot C_0}{100} \tag{2.71}$$

где W – относительная влажность воздуха, %.

Из условий массового расхода воздуха известна аналитическая зависимость для скорости воздуха от лопастей винтов:

$$v_i = \sqrt{\frac{b_л \cdot N_{лоп} \cdot C_y}{S \cdot 3\chi}} \cdot \frac{R_л \cdot \nu^2}{2} \tag{2.72}$$

где $b_л$ – ширина лопастей, м; $N_{лоп}$ – число лопастей, шт; C_y – коэффициент подъемной силы лопастей; ν – частота вращения винта, с$^{-1}$; χ – коэффициент кольцевых потерь лопастей вентилятора (0,044–0,1); $R_л$ – радиус лопасти, м.

Индуктивная скорость винта в режиме зависания с учетом тяги определяется:

$$v_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{2 \cdot \rho_в \cdot S}} \tag{2.73}$$

Индуктивная скорость во время полета с учетом наклона аппарата выражается:

$$\upsilon_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{2n\pi r^2 \rho_{\text{в}} \cdot \sqrt{\upsilon^2 \cos\phi^2 + (\upsilon sin\phi + {\upsilon_i}^2)^2}} \quad (2.74)$$

где ϕ – угол наклона аппарата, град.

Анализ представленных уравнений показывает, что важно учитывать отношение $d_p/d_{\text{П}}$ в зависимости от концентрации препарата в водном растворе, а также для уменьшения отношения $d_p/d_{\text{П}}$ (повышения конечного размера капель $d_{\text{П}}$ после испарения из них воды) необходимо повышать концентрацию препарата в рабочей жидкости – путём регулирования нормы ее расхода [163].

Главной характеристикой инерционного осаждения частиц (капель) является коэффициент захвата E, из проведенного анализа ясно, что E есть функция безразмерного критерия Стокса:

$$Stk = \frac{{d_{\text{к}}}^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot \upsilon_i}{18 \cdot \eta_{\text{в}} \cdot l} \quad (2.75)$$

где υ_i – индуктивная скорость i–го винта, м/с; $\eta_{\text{в}}$ – вязкость воздуха, Н·с/м^2; l – размер обтекаемого препятствия (высота стеблестоя и листьев растений), м.

При размерах капли < 100 мкм их масса очень мала, они огибают лист вместе с потоком воздуха и улетают дальше (снос ветром), как итог плохое покрытие. Величина коэффициента захвата k_E возрастает с увеличением размера капель и может быть найдена по эмпирической формуле: [163]

$$k_E = \frac{Stk^3}{Stk^3 + 0{,}775Stk^2 + 0{,}22} \cdot 100\% \quad (2.76)$$

Для случая применения БАС в качестве опрыскивателя, коэффициент захвата E можно регулировать скоростью обдувающего распылитель, т.е. скоростью воздушных потоков от винтов, все остальные параметры будут считать неизменными ($d, \eta_{\text{в}}, l$).

При применении опрыскивателя с параллельным обдувом воздушным потоком (случай для БАС) необходимо ввести безразмерный критерий Вебера – критерий, показывающий оседание капель на растение, при условии, что, $We \leq We_{\text{кр}} = 2$:

$$We = \frac{d_к \cdot \rho_в \cdot v_i^2}{2\sigma_ж} \quad (2.77)$$

Чтобы уменьшить снос, нужно увеличивать размер капель, но крупные капли повышают We, что ведет к их отскоку или стеканию с листа. Следовательно, необходимо регулировать размер капли и высоту полета, если лететь слишком высоко, капли теряют скорость, падают, и их уносит ветром. Обзор литературных источников и расчет по представленной зависимости показывают, что при $v_i = 20$ м/с, и $d_m = 300$ мкм значение $We = 1{,}93$, т.е. близко к критическому, а при $V_i > 20$ м/с и спектре размеров капель $d_m > 300$ мкм процесс распыления может быть нарушен. Например, для капель, образующихся вращающимся опрыскивателем, оптимальная скорость обдува $v_i = 18 - 20$ м/с. Согласно теории турбулентных струй, для опрыскивания с БАС, т.е. с воздушным обдувом, скорость воздушного потока v_i должна быть в 3 раза выше скорости ветра. При опрыскивании рекомендуемая скорость ветра ≤ 3 м/с. При низкой скорости полета доминирует нисходящий поток, капли «вбиваются» в почву строго под БПЛА. При высокой – вихри вытягиваются в длинные спирали позади дрона. Зона покрытия становится более широкой, но менее предсказуемой по плотности [9].

Высота опрыскивания – один из основополагающих факторов качества опрыскивания. Неравномерность плотности покрытия раствора может привести к недостаточному контролю биологической эффективности и токсичности при передозировке. Например, увеличение высоты обработки всего на 10 см способно увеличить в 2 раза потери препарата из–за сноса, которые к тому же дополнительно увеличиваются при сильном ветре. Также необходимо учитывать пересечение факелов распыла форсунок, расположенных под винто–моторной группой, особенно в условиях сжатых возможностей конструирования рамы БАС. Параметры высоты обработки будет зависеть от угла распыла форсунки, высоту измеряют до обрабатываемой поверхности. Сложность унификации высоты для обработки появляется из–за различного строения растений и применения разных типов препаратов с различным механизмом действия. Так при обработке подсолнечника фунгицидами важно доставить препарат до стебля и листьев, при

работе гербицидами избирательного действия по зерновым после кущения в выходе в трубку надо доставить препарат до сорной растительности находящейся на уровне почвы, при этом высота зерновых достигает до 30 см, а при работе фунгицидами для этих же зерновых уровень обработки – высота колоса. Усугубляется ситуация при увеличении скорости движения БАС, так как при полете за ним создается полоса разряжения и раствор смещается с краев к центру. Высокая скорость может привести к дрейфу и дополнительному испарению из–за набегающего потока воздуха. Так же возможны варианты различного направления ветра: при встречном ветре – происходит сложение скоростей потоков воздуха и БАС, при попутном – сценарий компенсации, идеальный вариант – боковой ветер, но эффект предсказать сложно [224]. Так как обычно полет БАС происходит в автоматическом режиме по параллельным маршрутам, то оператору для сохранения качества обработки стоит учитывать скорость и направление ветра для оптимизации курсового угла полета. Если обработка происходит гербицидами на зерновых в фазу кущения, когда сорняки видны, и зерновые не закрывают их, то возможность увеличения скорости, прежде всего, ограничена сносом за счет скорости ветра и сопротивления воздуха. Фактически в таких случаях получаем высокую эффективность и на повышенной скорости, если потери за счет сноса и испарения небольшие, т. е. при любой траектории капли раствора все равно попадут хотя бы на верхушки сорняков, и за счет системных свойств препарат проникнет во все части растений. Если приходится работать по сорнякам в стадии выхода в трубку или по шести листьям у подсолнечника, когда сорняки закрыты стеблестоем, то значительная часть раствора будет, прежде всего, попадать на верхнюю часть культуры (преимущественно с одной стороны – со стороны движения БАС, хотя и это не однозначно и зависит от направления ветра). Причем чем выше скорость, тем этот эффект сильнее, т. е. тут снижение качества будет заметнее. Рабочий раствор при этом попадает на растение под углом и большей частью на верхнюю часть растений. Капля, вылетая из сопла форсунки, летит не вертикально вниз, а из–за движения БАС – вперед и вниз, в зависимости от скорости и угла, под которым стоит форсунка (так же в зависимости от

конструктивных особенностей форсунки или потока воздуха от винтов). Эту закономерность надо всегда учитывать при оценке ожидаемого качества опрыскивания, чем выше стеблестой, тем труднее проникнуть каплям внутрь – в нижний ярус стеблестоя. Степень проникновения будет дополнительно снижаться при увеличении скорости движения, уменьшении величины капель, а также при применении форсунок с отклонением угла распыла от вертикали (вернее, получится сочетание влияния двух факторов – конструктивный угол распыла и угол отклонения за счет скорости и ветра) [222].

Для определения теоретической ширины опрыскивания в зависимости от высоты полета используется геометрическая формула, учитывающая угол факела распыла форсунок:

$$В_ш = L_ф + 2 \cdot h_n \cdot tan(\frac{\alpha_ф}{2}) \quad (2.78)$$

где $В_ш$ – ширина захвата, м; $L_ф$ – расстояние между крайними форсунками на БПЛА, м; h_n – высота полета БАС, м; $\alpha_ф$ – угол распыла форсунки.

Зная плотность осаждения, ширину опрыскивания можно рассчитать норму расхода рабочей жидкости $q_{пр}$ по формуле:

$$q_{пр} = \frac{Q_{мин} \cdot 600}{В_ш \cdot \upsilon} \cdot (\frac{В_ш}{В_{ш0}})^2 \cdot (1 + \frac{100 - k_E}{100}) \quad (2.79)$$

где $Q_{мин}$ – общий расход всех форсунок, л/мин; $В_{ш0}$ – базовая ширина захвата при минимальной высоте обработки (обычно 1 м), м.

Для различных типов препаратов разработаны рекомендации по плотности осаждения капель (таблица 2.14).

Таблица 2.14 - Рекомендуемая плотность капель для различных типов пестицидов

Тип препарата	Рекомендуемая плотность, шт/см^2
Гербициды почвенные	20–30
Гербициды системные	30–40
Инсектициды	50–70
Фунгициды	50–70
Контактные препараты	70–100
Десиканты	50–60

Зная рекомендуемую плотность осаждения для разных типов СЗР, можно рассчитать норму расхода рабочей жидкости $q_{\text{пр}}$ по упрощенной рабочей формуле:

$$q_{\text{пр}} = \frac{N_{\text{к}} \cdot {d_{\text{к}}}^3}{10^6} \quad (2.80)$$

где $q_{\text{пр}}$ – норма расхода рабочего раствора, л/га; $N_{\text{к}}$ – количество капель, шт/м^2; 10^6 – коэффициент пересчета единиц.

Концентрация препарата в баке определяется отношением гектарной дозы препарата к норме расхода рабочего раствора по формуле:

$$\text{С}_{\text{пр}} = \frac{\text{Д}_{\text{пр}}}{q_{\text{пр}}} \cdot 100\% \quad (2.81)$$

где $\text{С}_{\text{пр}}$ – концентрация препарата в рабочем растворе, %; $\text{Д}_{\text{пр}}$ – доза чистого препарата на гектар, указанная производителем препарата, л/га или кг/га.

При анализе видно, высота полета увеличивается – увеличивается ширина захвата. Для большинства концентратов эмульсий и водных растворов 8% – это допустимая концентрация (обычно до 10–15%). Для смачивающихся порошков принимают до 10 %. При расчетном значении $\text{С}_{\text{пр}}$>15% следует увеличить норму расхода рабочей жидкости или снизить скорость полета БПЛА. При росте концентрации выше определенных пределов вязкость раствора меняется. Это в свою очередь влияет на число Вебера и Стокса, так как капли становятся тяжелее и хуже дробятся форсункой.

Для получения уравнений количества капель и площади их покрытия на поверхности растении различной высоты при распространения рабочего раствора при различных параметрах обработки провели опытную обработку кукурузы [106]. На высотах 0, 50, 100 и 150 см от уровня почвы закреплялись учетные площадки 50х50 мм по 5 штук для каждой повторности, опыт повторяли в трёхкратной повторности. Рабочий раствор предварительно подкрасили красным красителем. На высотах 0, 50, 100 и 150 см от уровня почвы закреплялись учетные площадки 50х50 мм по 5 штук для каждой повторности, опыт повторяли в трёхкратной повторности. Рабочий раствор предварительно подкрасили красным красителем (рисунок 2.17).



Рисунок 2.17 - Изображение расположения учетных площадок 50х50 мм

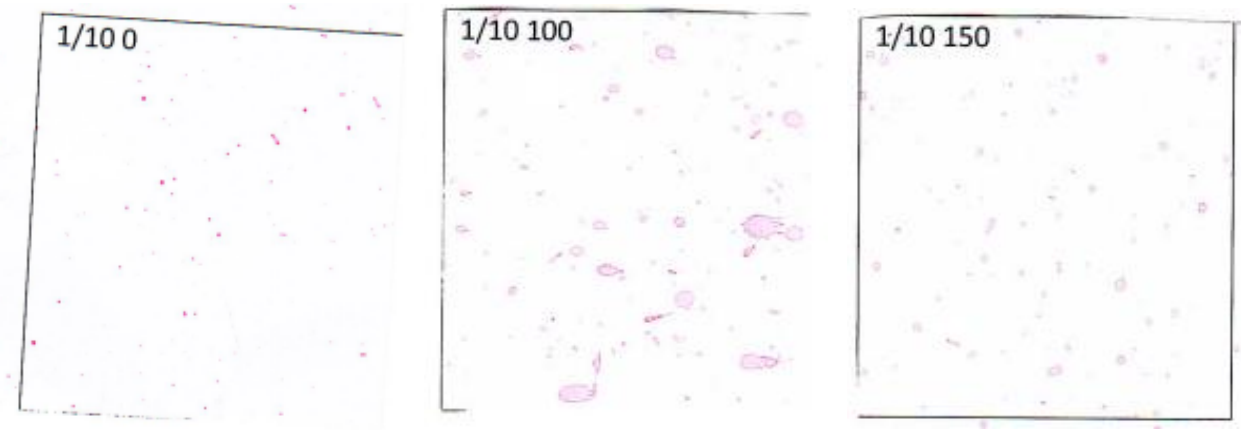
После обработки учетные площадки оцифровывали и оценивали среднее число осевших капель, площадь покрытия и содержание заключенной в них жидкости в расчёте на гектарную норму расхода по общепринятой методике, оценивали спектр дисперсности капель и их средний (по массе) размер d_m (рисунок 2.18).

Качество распыления рабочей жидкости определяли в соответствии с общепринятым коэффициентом монодисперсности [163]:

$$k_m = \frac{\sigma}{d_m} \tag{2.82}$$

где σ – стандартное среднеквадратичное отклонение размеров капель от их среднего d_m, м.

Для получения уравнения описывающего качество опрыскивания через количество капель и площадь их покрытия построена регрессионная модель. В качестве независимых переменных приняты основные параметры обработки: $\boldsymbol{x_1}$ – высота h_n, м *(3 уровня – 1; 3; 5)*; интервал варьирования *2 м*; $\boldsymbol{x_2}$ – норма расхода $q_{пр}$, л/га *(3 уровня –5; 10; 15)*, интервал варьирования *5 л/га*.



а) б) в)

Рисунок 2.18 - Изображение учетных площадок для контроля качества опрыскивания на высоте полета 1 м при норме расхода 10 л/га: а) – уровень растения 0 см; б) –уровень растения 100 см; б) –уровень растения 150 см

В качестве зависимых переменных были приняты: y_1 – количество капель, шт/см^2; y_2 – площадь капель, мм^2.

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 2.15.

Таблица 2.15 - Матрица опыта с экспериментальными данными

№ опыта	x_1	x_2	x_1	x_2	x_1x_2	x_1^2	x_2^2	y_1	y_2
1	–1	–1	1	5	5	1	25	214,4	16,9
2	–1	0	1	10	10	1	100	323,6	23,68
3	–1	+1	1	15	15	1	225	836,2	27,1
4	0	–1	3	5	15	9	25	168,7	19,6
5	0	0	3	10	30	9	100	356,4	24,2
6	0	+1	3	15	45	9	225	515,8	23,4
7	+1	–1	5	5	25	25	25	123,9	26,7
8	+1	0	5	10	50	25	100	560	40,6
9	+1	+1	5	15	75	25	225	277,4	23,7

Регрессионный анализ факторов и определение значимости коэффициентов уравнений были проведены при помощи программы STATISTICA 6.0. Корреляционный анализ произведен методом Пирсона. Аппроксимация была проведена методом полинома. Результаты регрессионного анализа приведены в таблице 2.16.

Таблица 2.16 - Регрессионный анализ влияния высоты и расхода на количество капель (зависимой переменной y_1)

Коэффициент корреляции модели R= 0,85; критерий Фишера F(5,3)=1,6957						
	Коэффициент регрессии при переменной	Стандартная ошибка оценки коэффициентов регрессии	Сдвиг и нестандартизированный коэффициент	Стандартная ошибка оценки сдвига и нестандартизированного коэффициента эмпирической формулы	Критерий Стьюдента	p – уровень значимости
Сдвиг			–370,918	604,4452	–0,61365	0,58284
x_1	0,14710	1,721067	19,242	225,1332	0,08547	0,93727
x_2	2,26185	2,136094	118,349	111,7692	1,05887	0,36736
x_1x_2	–1,17690	0,950719	–11,708	9,4575	–1,23791	0,30379
x_{12}	0,49376	1,561843	10,571	33,4373	0,31614	0,77261
x_{22}	–0,88464	2,066124	–2,291	5,3500	–0,42817	0,69741

Уравнение регрессии, описывающее влияния параметров получено на основании регрессионного анализа, представленного в таблице 2.16:

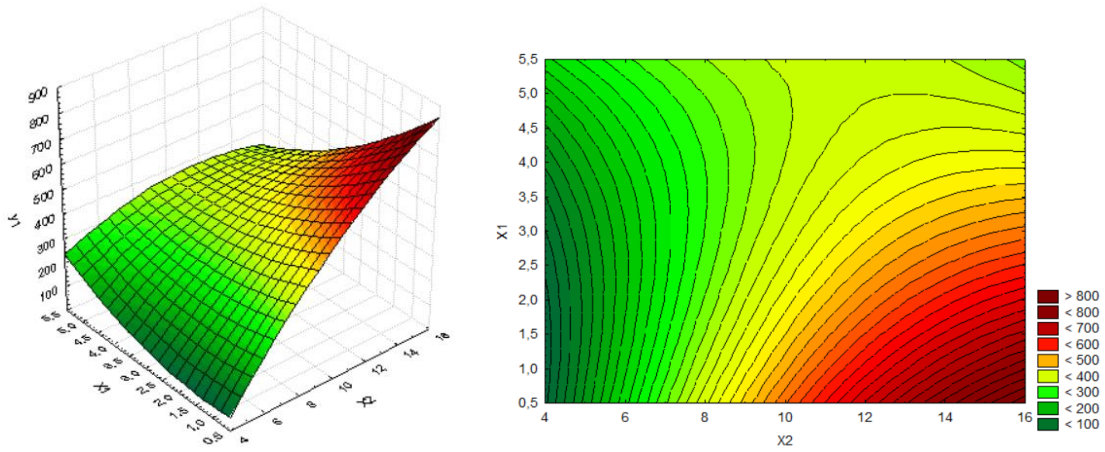
$$y_1 = –370{,}9181+118{,}3492\ x_1+19{,}2417\ x_2–2{,}2907\ x_1^2–11{,}7075\ x_1\ x_2+10{,}5708\ x_2^2 \qquad (2.83)$$

Уравнение регрессии позволяет оценить степень влияния независимых переменных и их сочетаний на зависимую переменную. Каждый из коэффициентов регрессии в уравнении (2.87) отражает уровень изменения количества капель, при изменении одного из параметров. Коэффициент детерминации составил 0,73, что говорит о хорошем качестве построенной модели. Он показывает, что 73 % изменчивости количества капель объясняется взаимодействием рассмотренных параметров обработки (x_1; x_2), а доля вариации y_1, определяемая выражением 1 – R^2, что составляет 27 %, оказывается необъяснённой. В тоже время F–тест (критерий Фишера) показал, что высота полета и расход раствора объясняют значимую долю вариации y_1. При этом переменная y_1 уже не является случайной величиной и зависит, по крайней мере, от одной из независимых переменных.

С позиции дальнейшего применения наибольшую ценность представляет эмпирическая математическая модель, представленная полином второй степени:

$$N_к = –370{,}9181+118{,}3492\ h_n+19{,}2417\ q_{пр}–2{,}2907\ h_n^2–11{,}7075\ h_n\ q_{пр}+10{,}5708\ q_{пр}^2 \qquad (2.84)$$

Анализ экспериментально полученных наблюдаемых значений переменной y_1 и предсказанных регрессионной моделью представлен графически на рисунке 2.19.



а) б)

Рисунок 2.19 - Диаграмма влияния (а) и (б) поверхность проекции высоты полета (x1) и расхода рабочей жидкости (x2) на количество осаждаемых капель (y1)

Распределение капель по высоте растения представлено на графике (рисунок 2.20)

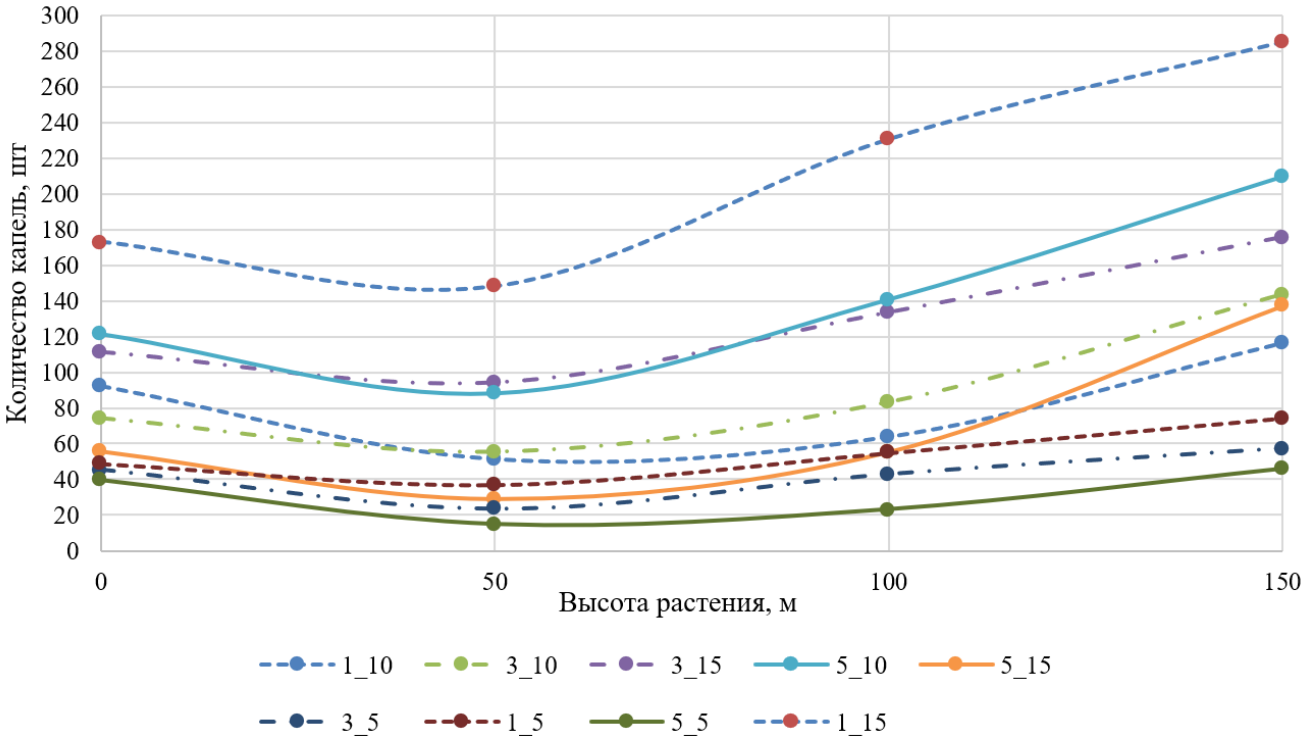


Рисунок 2.20 - График распределения капель по высоте растения

Аналогичным образом рассматривали переменную y_2 (таблица 2.17)

Таблица 2.17 - Регрессионный анализ влияния высоты расхода на площадь покрытия (зависимой переменной y_2)

Коэффициент корреляции модели R= 0,88; критерий Фишера F(5,3)=2,1104						
	Коэффициент регрессии при переменной	Стандартная ошибка оценки коэффициентов регрессии	Сдвиг и нестандартизированный коэффициент	Стандартная ошибка оценки сдвига и нестандартизированного коэффициента эмпирической формулы	Критерий Стьюдента	p – уровень значимости
Сдвиг			–9,86944	16,28577	–0,60602	0,58728
x_1	–0,21586	1,583943	–0,82667	6,06584	–0,13628	0,90022
x_2	4,32902	1,965903	6,63133	3,01143	2,20205	0,11495
x_1x_2	–1,13313	0,874972	–0,33000	0,25482	–1,29505	0,28596
x_{12}	1,61412	1,437405	1,01167	0,90091	1,12294	0,34322
x_{22}	–3,47906	1,901508	–0,26373	0,14415	–1,82963	0,16473

Уравнение регрессии, описывающее влияния параметров получено на основании регрессионного анализа, представленного в таблице 2.17:

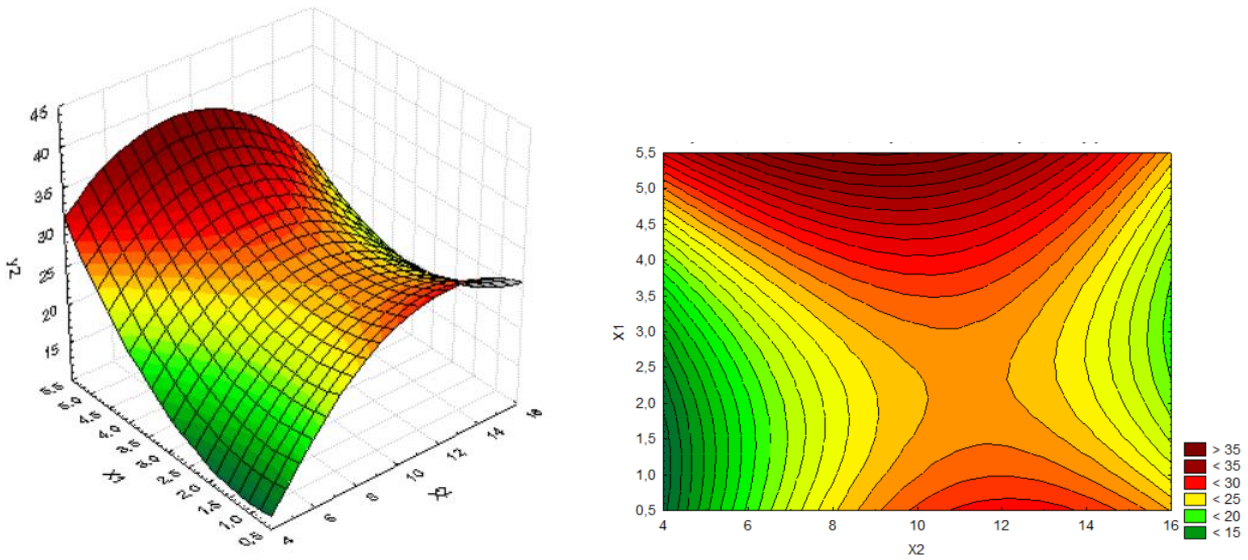
$$y_2 = –9{,}8694+6{,}6313x_1–0{,}8267\ x_2–0{,}2637\ x_1^2–0{,}33\ x_1x_2+1{,}0117\ x_2^2 \qquad (2.85)$$

Данная модель имеет самое высокое качество построения, так как коэффициент детерминации составляет 0,88 %. Он показывает, что 88 % изменчивости площади объясняется взаимодействием рассмотренных параметров обработки (x_1; x_2), а доля вариации y_2, определяемая выражением $1 – R^2$, что составляет 12 %, оказывается необъяснённой. Критерий Фишера показал, что независимые переменные объясняют значимую долю вариации y_2.

Эмпирическая математическая модель представлена в выражении (2.86). Даная математическая модель позволяет оценить влияние высоты и расхода на изменение площади покрытия:

$$S_к = –9{,}8694+6{,}6313h_n–0{,}8267\ q_{пр} –0{,}2637\ h_n^2–0{,}33\ h_n\ q_{пр} +1{,}0117\ q_{пр}^2 \qquad (2.86)$$

Анализ экспериментально полученных наблюдаемых значений переменной y_2 и предсказанных регрессионной моделью представлен на рисунке 2.21.



а) б)

Рисунок 2.21 - Диаграмма влияния (а) и (б) поверхность проекции высоты (x1) и расхода (x2) на площадь покрытия (y2)

Распределение площади покрытия капель по высоте растения представлено на графике (рисунок 2.22).

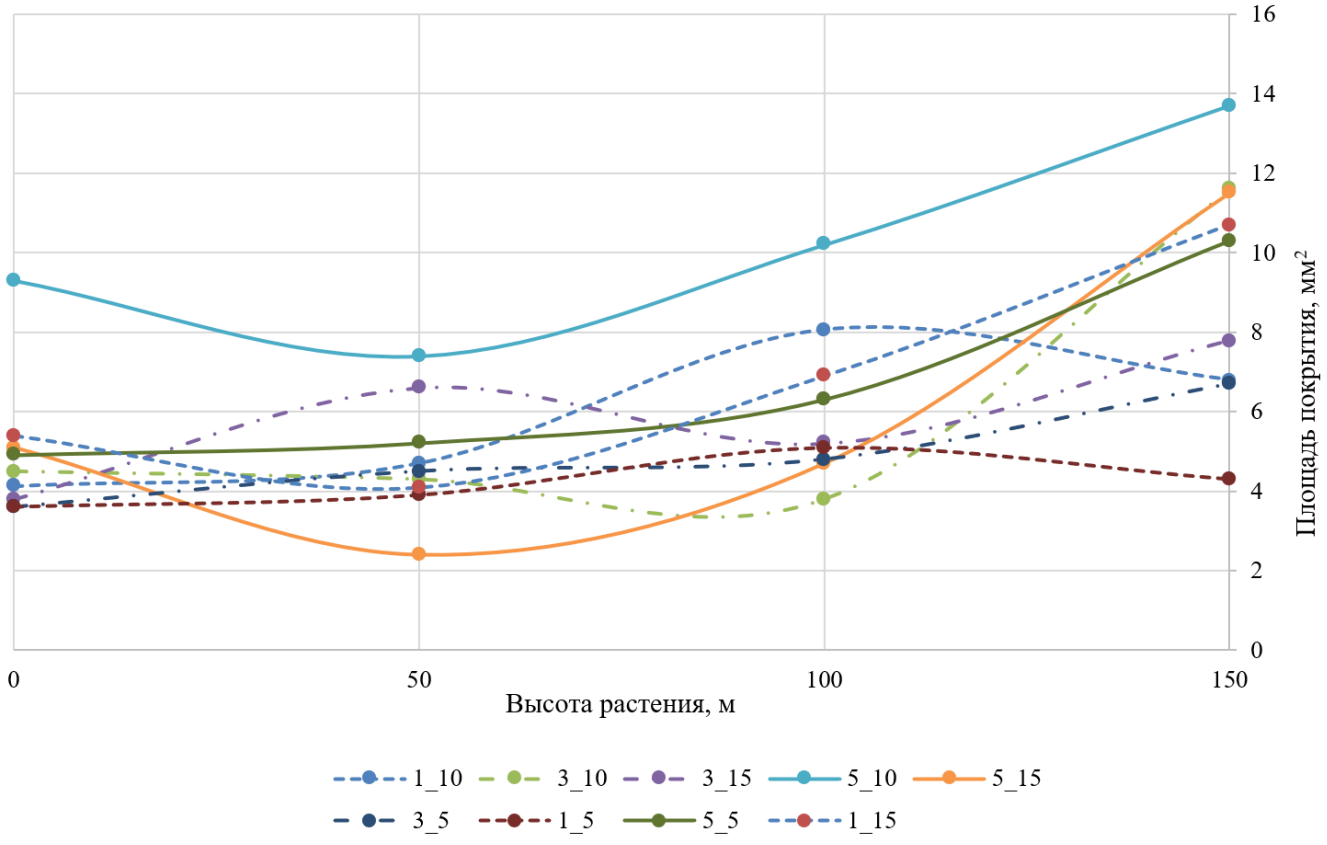


Рисунок 2.22 - Распределение площади покрытия капель по высоте растения

Полученные уравнения регрессии представим в виде системы:

$$\begin{cases} \mathrm{N_к} = -370{,}9181 + 118{,}3492\ h_n + 19{,}2417\ q_{\mathrm{пр}} - 2{,}2907\ {h_n}^2 - 11{,}7075\ h_n\ q_{\mathrm{пр}} + 10{,}5708\ q \\ \mathrm{S_к} = -9{,}8694 + 6{,}6313 h_n - 0{,}8267\ q_{\mathrm{пр}} - 0{,}2637\ {h_n}^2 - 0{,}33\ h_n\ q_{\mathrm{пр}} + 1{,}0117\ {q_{\mathrm{пр}}}^2 \end{cases} \quad (2.87)$$

Полученная система уравнений позволяет упрощено производить расчет количества капель и площади покрытия при высотах от 1 до 5 м и расхода рабочей жидкости от 5 до 15 л/га.

В результате получена система уравнений B, 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:

$$B = \begin{cases} t_{\text{искап}} = \dfrac{\rho_{\text{ж}} \cdot ({d_{\text{к}}}^2 - d_{\text{П}}^2)}{8 \cdot \psi \cdot (C_0 - C_\infty) \cdot \left[2 + 0{,}6\sqrt{\frac{d_{\text{к}} \cdot v_i}{u_n}} \cdot \sqrt[3]{\frac{u_n}{\psi}}\right]};\ d_{\text{к}} = 50 \div 300 \\ Stk = \dfrac{{d_{\text{к}}}^2 \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot v_i}{18 \cdot \eta_{\text{в}} \cdot l};\ v_i \geq 3u_n \\ k_E = \dfrac{Stk^3}{Stk^3 + 0{,}775 Stk^2 + 0{,}22} \cdot 100\%;\ k_E = 0{,}7 \div 0{,}8 \\ We = \dfrac{d_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot v_i^2}{2\sigma_{\text{ж}}};\ We \leq 2 \\ \mathrm{B_ш} = L_{\text{ф}} + 2 \cdot h_n \cdot tan\left(\dfrac{\alpha_{\text{ф}}}{2}\right);\ h_n > 1\ , h_n = 2 \div 7 \\ q_{\text{пр}} = \dfrac{Q_{\text{мин}} \cdot 600}{\mathrm{B_ш} \cdot v} \cdot \left(\dfrac{\mathrm{B_ш}}{\mathrm{B_{ш0}}}\right)^2 \cdot \left(1 + \dfrac{100 - k_E}{100}\right);\ q_{\text{пр}} > \text{Д}_{\text{пр}} \\ \mathrm{N_к} = -370{,}9181 + 118{,}3492\ h_n + 19{,}2417\ q_{\text{пр}} - 2{,}2907\ {h_n}^2 - 11{,}7075\ h_n\ q_{\text{пр}} + 10{,}5708\ {q_{\text{пр}}}^2 \\ \mathrm{S_к} = -9{,}8694 + 6{,}6313 h_n - 0{,}8267\ q_{\text{пр}} - 0{,}2637\ {h_n}^2 - 0{,}33\ h_n\ q_{\text{пр}} + 1{,}0117\ {q_{\text{пр}}}^2 \\ \mathrm{N} = 20 \div 100, \mathrm{S} \rightarrow max \end{cases} \quad (2.88)$$

Для определения параметров полетного задания можно воспользоваться разработанной номограммой (рисунок 2.23). Номограмма предназначена для инженерного расчёта параметров опрыскивания с БАС без сложных вычислений по системе уравнений.

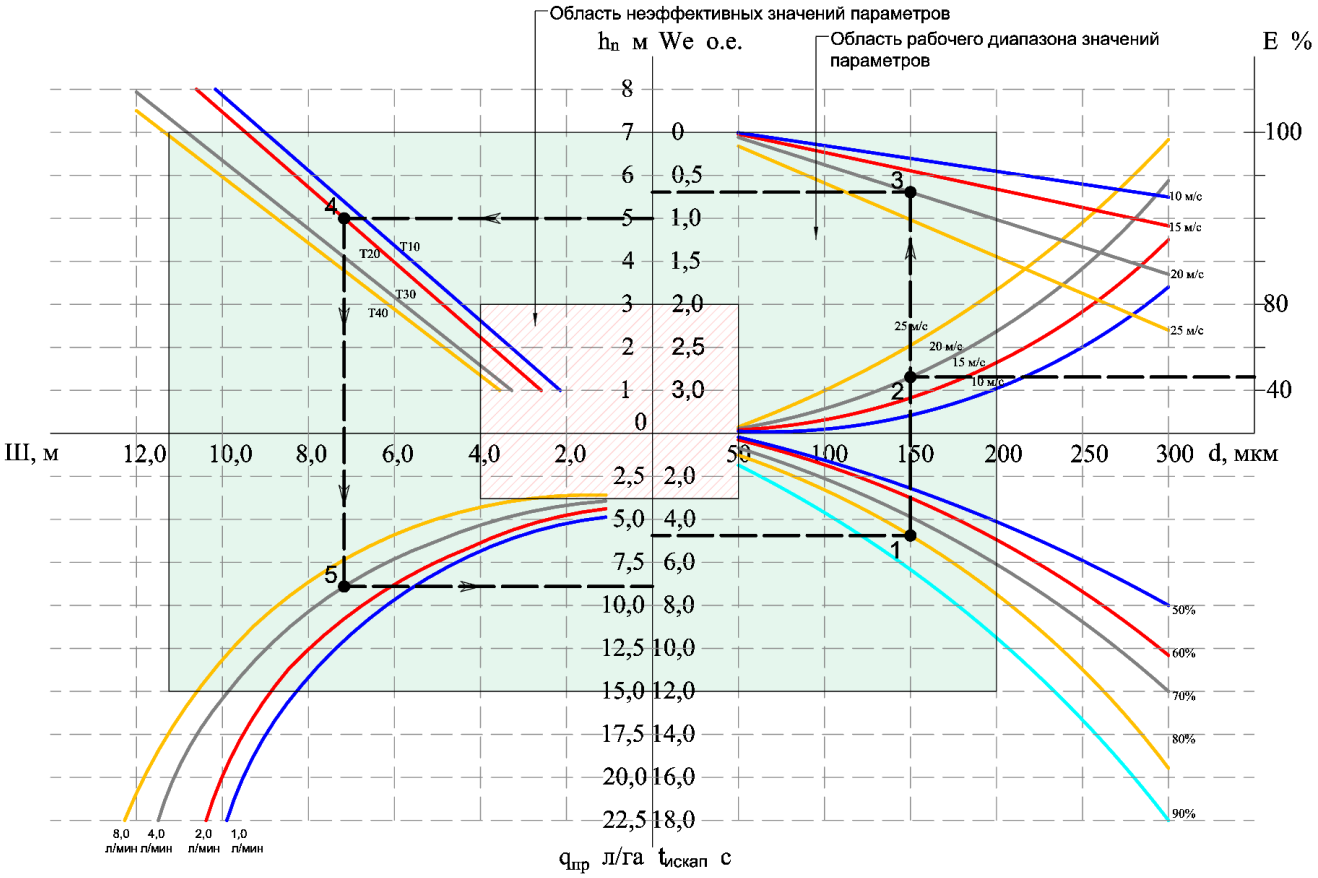


Рисунок 2.23 - Номограмма расчета параметров опрыскивания с БПЛА

Пошаговый алгоритм работы с номограммой, основываясь на описании методики, следующий:

Шаг 0. Определение исходных параметров. Перед использованием номограммы необходимо знать или выбрать: тип препарата → рекомендуемая плотность капель, тип распылителя и частота вращения → ожидаемый диаметр капель, скорость полёта БАС, высоту полёта, угол распыла форсунки, расстояние между крайними форсунками, расход форсунок, метеоусловия (температура, влажность – для проверки допустимости).

Шаг 1. Проверка времени испарения $t_{\text{искап}}$. Номограмма включает график для быстрой оценки $t_{\text{искап}}$ в зависимости от влажности и температуры воздуха. Если время испарения меньше времени падения капли, то нужна коррекция (увеличить размер капли или снизить высоту). При размере капли 150 мкм, влажности воздуха 80% и температуре 17 °C время испарения капли составит 5 с.

Шаг 2. Определение коэффициента захвата k_E (через критерий Стокса). В номограмме, есть шкала для определения k_E в зависимости от диаметра капли $d_к$, индуктивной скорости v_i (скорость воздушного потока от винтов) высоты стеблестоя l. При индуктивной скорости 20 м/с $We = 0{,}75$, k_E =0,5.

Шаг 3. Далее осуществляется контроль числа Вебера We. Если $We \leq 2 \rightarrow$ капли оседают без отскока/стекания. Если $We > 2 \rightarrow$ увеличить $d_к$ или уменьшить v_i.

Шаг 4. Нахождение базовой ширины захвата. По левой верхней части номограммы (представлено семейством кривых для разных $\alpha_ф$ или $L_ф$) определить геометрическую ширину захвата. Провести вертикаль от выбранной высоты h_nдо пересечения с кривой угла распыла → снять значение $B_ш$. При высоте полета 5 метров для DJI T20 ширина захвата составит 7 метров.

Шаг 5. Определение нормы расхода рабочей жидкости $q_{пр}$. Провести линию от нужного $Q_{мин}$ до шкалы $q_{пр}$. При расходе форсунок 4 л/мин расход рабочей жидкости – 8,5 л/га.

Шаг 5. Корректировка $q_{пр}$ с учётом захвата и сноса.

Шаг 6. Проверка концентрации препарата. Если $C_{пр} > 15\% \rightarrow$ увеличить $q_{пр}$ (уменьшить скорость или увеличить расход форсунок). Если $C_{пр}$ слишком мала (<4–5%) можно снизить $q_{пр}$, но проверить E и We.

Шаг 9. Итерация параметров. Если какой–либо критерий не выполняется ($We > 2$, $C_{пр} > 15\%$, $t_{искап}$ мало, E низкий), то изменить высоту полёта h_n, скорость полёта v, тип форсунки (частоту вращения $\rightarrow d_к$).

Шаг 10. Выходные параметры для полётного задания можно загружать в БАС для автоматического режима обработки.

Вихри от винтов в паре с нисходящим потоком превращают простое падение капель в сложный аэродинамический процесс [11–14]. Вихри подхватывают мелкие капли (с низким Stk) и закручивают их к краям зоны опрыскивания. В центре под БПЛА может образоваться «провал» (меньше капель), а по краям захвата – избыточная концентрация. Это нарушает равномерность внесения

препарата. Мелкие капли, попавшие в концевой вихрь, могут подняться выше уровня полета БПЛА [78, 221]. Вместо того чтобы лететь к растению, они зависают в турбулентном шлейфе и уносятся даже слабым боковым ветром. Для решения практических задач с учетом типа операции и культуры произведем моделирование воздушных потоков от винтов БАС в COMSOL Multiphysics. Для модели в COMSOL Multiphysics необходимо перейти от чистого лагранжева движения частиц к модели тепло– и массопереноса. Испарение критически влияет на коэффициент захвата, так как при уменьшении диаметра капли снижается число Стокса, и она легче подхватывается вихрями. В COMSOL Multiphysics эти уравнения решаются совместно с уравнением движения, число Стокса становится переменным во времени.

Модель включает следующие настройки: модуль Turbulent Flow и Rotating Machinery → Rotating Domain (для вращения винта). Задаем шаг и размер винта, скорость вращения. Данная информация предоставляется производителем БАС. Скорость вращения измерена опытным путем, лазерным тахометром (в статичном состоянии), по данным log–файлов в разных режимах полета и полученных осциллограмм. Расчётную область зададим не менее 5 диаметров винта, для избегания граничных эффектов. Расчётная сетка строиться с уменьшением у лопастей винта, Swept Mesh используется для вращающейся зоны. В зависимости от условий полета применял решатель Stationary (если установившееся течение) или Time–Dependent (для вихрей). Визуализация модели представлена на рисунке 2.24 и 2.25.

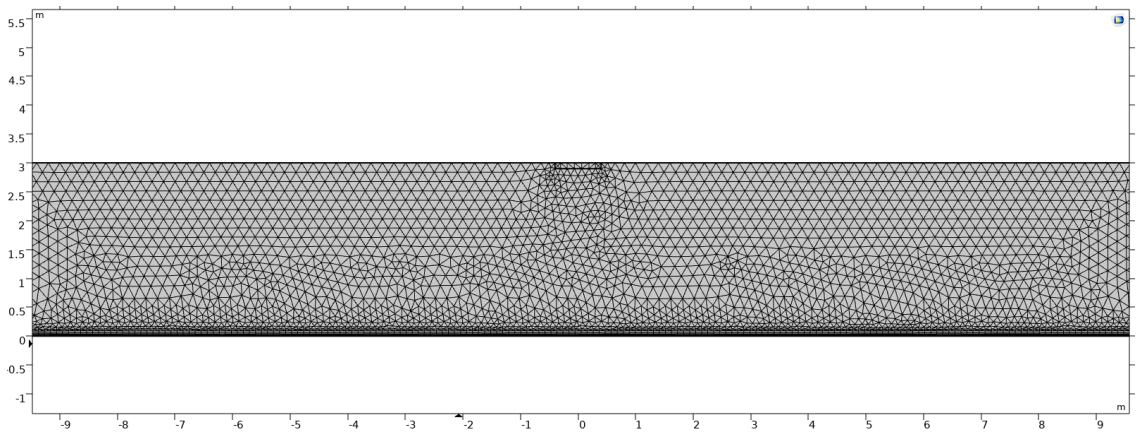


Рисунок 2.24 - Сетка моделирования

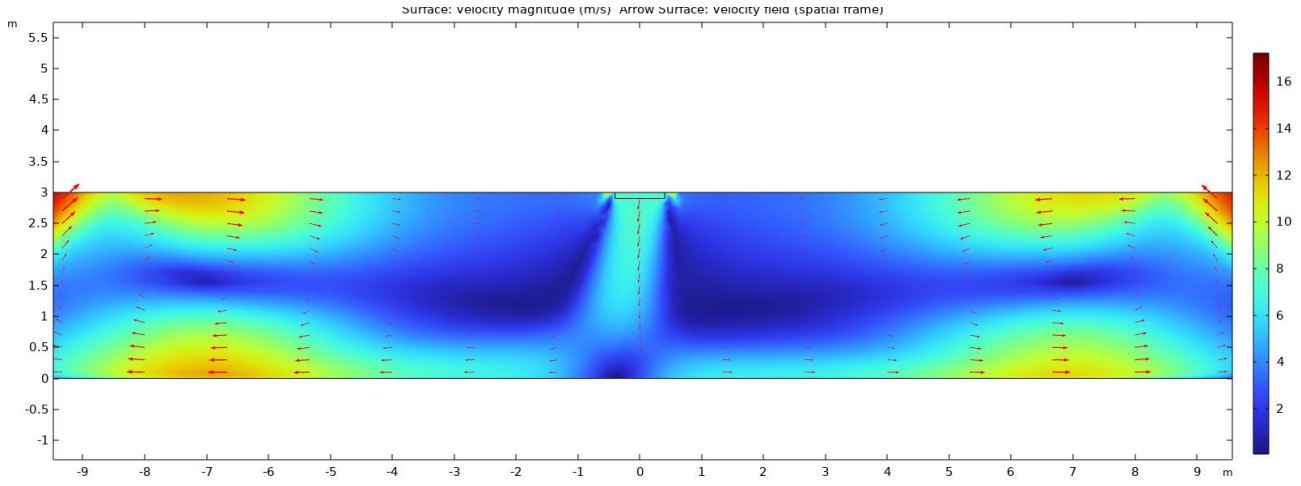


Рисунок 2.25 - Изображение результатов моделирования распространения воздушных потоков на высоте 3 метра

Разработанная 2D–модель в COMSOL Multiphysics позволяет качественно и количественно оценить структуру воздушного потока, создаваемого вращающимися лопастями. При этом важно понимать, что 2D–приближение является упрощённым, поскольку оно не учитывает трёхмерные эффекты, такие как концевые вихри на концах лопастей или радиальное течение. Тем не менее, 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. 2D–модель может быть применена для предварительных оценок разных типов БАС.

Важно учитывать ограничения модели - необходимость правильного выбора турбулентной модели, поскольку для реалистичных скоростей вращения почти всегда требуется турбулентная модель (например, k–ε или SST), а также возможные паразитные отражения от границ при неправильной настройке входных и выходных условий. Несмотря на это, 2D–модель имеет высокую практическую значимость, она подходит для быстрого расчета параметров опрыскивания в зависимости от типа лопасти, их количества и скорости вращения.

2.5 Описание электротехнологических процессов повышения качества обработок с применением БАС

В последние годы большое внимание уделяется внедрению ресурсосберегающего земледелия. Химический метод борьбы относится к ресурсосберегающим технологиям, при этом необходимо учитывать затраты, требующиеся на ликвидацию или компенсацию ущерба, нанесенного природе, здоровью человека, сельскохозяйственным животным, качественным характеристикам урожая. В растениеводстве применяют большое количество препаратов (рисунок 2.26).



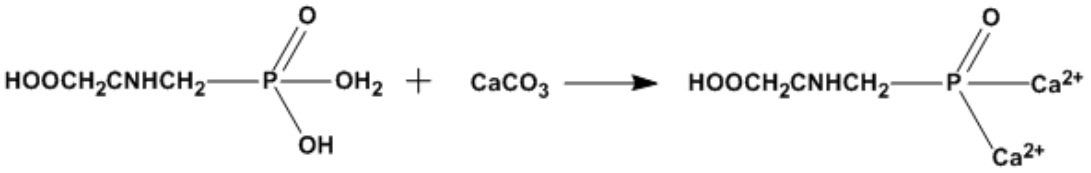
Рисунок 2.26 - Классификация пестицидов по виду уничтожаемого микроорганизма

Повлиять на биологическую эффективность можно путем изменения качества рабочего раствора, при этом основные параметры, влияющие на качество раствора: температура, жесткость и уровень pH [90, 127].

При температуре ниже 12 °С возникают проблемы с растворением порошков и гранул. Для качественного растворения требуется больше времени и наличие перемешивающего устройства в смесительном узле. Плохая растворимость

приводит с существенному снижению качества обработки, засорению и разрушению форсунок, выпадению препарата в осадок [93, 226].

Завышенное содержание солей кальция и магния в исходной воде для приготовления рабочего раствора приводит к выпадению осадков некоторых химических веществ. Определяют количество солей растворимых в воде по показателю электропроводности воды, этот показатель зависит от уровня солей в залегающих породах и почвах. Вода с большим содержанием кальциевых или магниевых солей (жесткая вода) вызывает проблемы со смешиванием, поскольку снижается стабильность суспензий и эмульсий. Активность препарата снижается при наличии высокого уровня кальциевых и магниевых солей, а также гидрокарбоната натрия.

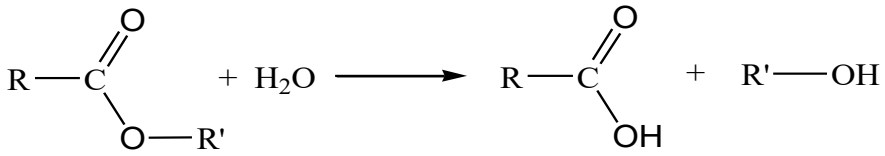


(2.89)

Большинство препаратов чувствительны к щелочному гидролизу – разрушаются в щелочной среде. При этом ряд активных ингредиентов распадается, что приводит к снижению эффективности. Кислотная среда влияет на стабильность и физические свойства некоторых формуляций. Оптимальный уровень водородного показателя, рекомендованный большинством производителей препаратов, находится в диапазоне pH от 5,0 до 5,5. Инсектициды на основе паратион–метила, перметрина, имидаклоприда, фунгициды на основе тиофанат–метила, беномила, ципродинила, флудиоксонила, фитогормоны на основе гиббереллиноваой кислоты, большинство органофосфатов, карбаматов некоторые пиретроиды чувствительны к щелочному гидролизу. При уровне pH 4–7 сокращается период полураспада некоторых органофосфатов. При уровне водородного показателя 7,5 и выше период полураспада уменьшается до 20 минут.

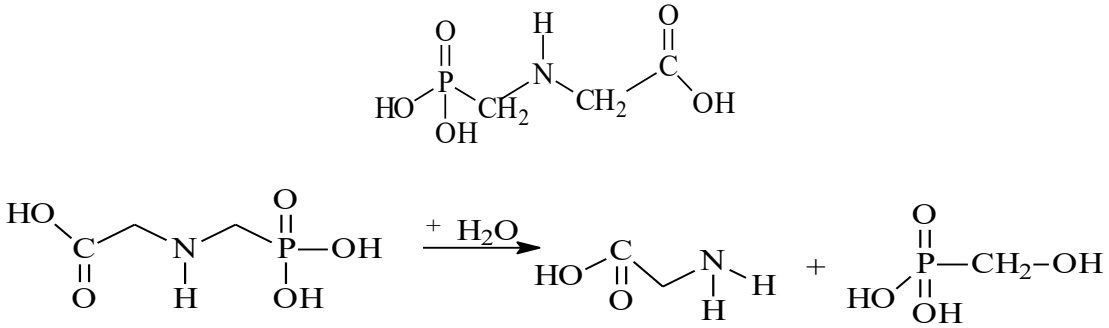
Химические превращения, на примере гербицидов, водной среде в основном представляют собой гидролитические процессы. Скорость этих процессов зависит от вида и числа атомов, длины углеводородной цепочки. В ходе гидролиза

химиката, имеющего в составе молекул определенные функциональные группы R–X, происходит присоединение воды:

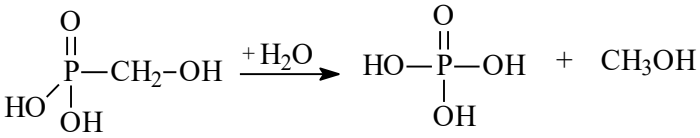


(2.90)

Примером гидролиза гербицидов группы глифосат, может служить разложение глифосата, в процессе которого происходит гидролитическая замена фосфат – группы на ОН–группу в молекуле:



(2.91)



Важным параметром рабочей жидкости пестицидных препаратов является поверхностное натяжение. От поверхностного натяжения зависит качество распыления, смешиваемость и удержание образующихся капель на листовой поверхности растений, а также скорость испарения. Все указанные параметры улучшаются с уменьшением поверхностного натяжения, которая в свою очередь уменьшается с увеличением концентрации препарата в рабочем растворе. При малых расходах жидкости (<50 л/га) уменьшается отношение $d_p/d_{\text{П}}$ и поверхностное натяжение, что повышает привлекательность применения БАС в растениеводстве для опрыскивания [163]. Классификация пестицидов и их чувствительность к показателям воды приведены в таблице 2.18.

Таблица 2.18 - Классификация пестицидов и их чувствительность к показателям воды

Группа пестицидов	Влияние pH	Влияние жесткости	Влияние минерализации	Влияние температуры	Примечание
Гербициды					
Сульфонилмочевины	6,0–7,5	Высокая (осаждение в жесткой воде)	Низкая (но высокие TDS могут снижать эффективность)	Разлагаются при T > 25°C	Чувствительны к щелочному гидролизу
Феноксикислоты	5,0–6,0	Средняя (возможны комплексы с Ca^{2+})	Умеренная (высокие соли снижают растворимость)	Стабильны до 30°C	Эффективность падает в щелочной среде
Глифосат	4,5–6,0	Очень высокая (образует нерастворимые соли с Ca^{2+}/Mg^{2+})	Низкая	Стабилен до 40°C, но быстро разлагается на свету	Требует мягкой воды
Триазины	5,5–7,0	Низкая	Высокая (конкуренция за сорбционные участки)	Стабильны до 35°C	Менее эффективны в высокоминерализованных водах
Фунгициды					
Триазолы	6,0–7,5	Низкая	Умеренная (высокие TDS могут снижать эффективность)	Стабильны до 30°C	Чувствительны к окислению
Дитиокарбаматы	6,0–8,0	Низкая	Высокая (разлагаются в соленой воде)	Разлагаются при T > 25°C	Требуют нейтральной среды
Медьсодержащие	6,5–8,0	Высокая (взаимодействие с карбонатами)	Очень высокая (образует нерастворимые соединения)	Стабильны до 50°C	Фитотоксичны в кислой среде
Стробилурины	5,5–7,0	Низкая	Низкая	Разлагаются при T > 35°C	Чувствительны к щелочам
Инсектициды					
Пиретроиды	5,5–6,5	Низкая	Низкая	Летучи при T > 30°C	Чувствительны к УФ
Неоникотиноиды	6,0–7,5	Низкая	Низкая	Стабильны до 40°C	Устойчивы к жесткости
Карбаматы	6,0–7,0	Средняя	Низкая	Разлагаются при T > 30°C	Чувствительны к щелочам
Авермектины	6,0–7,0	Низкая	Низкая	Разлагаются при T > 25°C	Фоторазлагаемы

В кислой среде происходит протонирование функциональных групп. В щелочной среде нуклеофильное замещение (например, у фосфорорганических

соединений). Зависимость гидролиза пестицидов от уровня pH воды можно описать уравнением:

$$\text{Препарат} + H_2O \xrightarrow{pH} \text{Продукты разложения} \quad (2.92)$$

Образование комплексов с ионами жесткости описывается уравнением:

$$\text{Препарат} + Ca^{2+} \rightarrow \text{Препарат} - Ca \downarrow \ (\text{нерастворимый осадок}) \quad (2.93)$$

Термическое разложение описывается уравнением:

$$\text{Препарат} \xrightarrow{\Delta T} \text{Летучие соединения} + \ \text{Остатки} \quad (2.94)$$

Концентрация пестицида в растворе (C) зависит от времени (t) и параметров среды:

$$\frac{dC}{dt} = (k_{\text{гидр}(pH)} \cdot C + k_{\text{компл}(Ca^{2+},Mg^{2+})} \cdot C + k_{\text{соль(М)}} + k_{\text{терм}(T)} \cdot C) \quad (2.95)$$

где $k_{\text{гидр}(pH)}$ – постоянная скорости гидролиза, о.е.; $k_{\text{компл}(Ca^{2+},Mg^{2+})}$ – постоянная скорости образования нерастворимых комплексов, о.е.; $k_{\text{соль(М)}}$ – ионная сила раствора, о.е.; $k_{\text{терм}(T)}$ – постоянная термического разложения, о.е.

Постоянная скорости гидролиза $k_{\text{гидр}(pH)}$ зависит от pH, и описывается уравнением Бренстеда:

$$k_{\text{гидр}(pH)} \cdot C = k_0 + k_H \cdot [H^+] + k_{OH} \cdot [OH^-] \quad (2.96)$$

Постоянная скорости образования нерастворимых комплексов $k_{\text{компл}(Ca^{2+},Mg^{2+})}$ может быть найдена по выражению:

$$k_{\text{компл}(Ca^{2+},Mg^{2+})} = \alpha_э \cdot [Ca^{2+}] + \beta_э \cdot [Mg^{2+}] \quad (2.97)$$

где $\alpha_э$ и $\beta_э$ коэффициенты, о.е. ($\alpha_э$ = 0,1–0,5; $\beta_э$= 0,3–0,7)

Ионная сила раствора, зависит от минерализации воды (высокая минерализация >500 ppm снижает растворимость неполярных пестицидов):

$$k_{\text{соль(М)}} = \gamma \cdot \sqrt{I} \quad (2.98)$$

где γ – поверхностное натяжение жидкости (0,065–0,075), Н·м$^{-1}$.

Постоянная термического разложения рассчитывается по уравнению Аррениуса:

$$k_{\text{терм}(T)} = A \cdot e^{\frac{E_0}{RT}} \quad (2.99)$$

где E_0 – энергия активации, Дж/моль (50–200 кДж/моль), R – универсальная газовая постоянная, Дж/мольК.

Итоговое уравнение разложения препарата в рабочем растворе может быть представлена уравнением:

$$C(t) = C_н \cdot e^{-(k_{\text{гидр}}+k_{\text{компл}}+k_{\text{терм}})\cdot t} \quad (2.100)$$

где $C_н$– начальная концентрация раствора, моль/м^3.

Для гербицидов, фунгицидов и инсектицидов получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} C(t) = C_н \cdot e^{-(0{,}1[OH^-]+0{,}05[Ca^{2+}]+0{,}001\cdot e^{-60/RT})\cdot t} \\ C(t) = C_н \cdot e^{-(0{,}01[OH^-]+0{,}002\cdot e^{-80/RT})\cdot t} \\ C(t) = C_н \cdot e^{-(0{,}2[OH^-]+0{,}3[Ca^{2+}]+0{,}005\cdot e^{-50/RT})\cdot t} \end{cases} \quad (2.101)$$

В результате можно сделать вывод, что за счет корректирования показателя pH, минерализации, жесткости и температуры у гербицидов возможно повысить эффективность на 18%, у фунгицидов – на 20–25%, у инсектицидов – на 15–30%, у десикантов на 13–25%.

Одним из известных способов повышения качества воды в растворе пестицидов является электрохимическая активация воды (ЭХАВ). Данный способ был подробно исследован [117, 126, 128, 193] и даны рекомендации и методики для расчёта конструкций под конкретные задачи производства. Серьезным фактором ограничения внедрения в АПК являлась высокое энергопотребление для производства ЭХАВ, но при внедрении БАС с УМО значительно снизился объем рабочего раствора (5–15 л/га), что делает технологию привлекательной и конкурентноспособной по экономическим показателям с химическими препаратами (стабилизаторами и умягчителями) и делает производство продуктов экологичнее.

Из анализа литературных источников [84, 116] и уравнения 2.178 получена система уравнений Т1, которая описывает электротехнологические процессы повышения качества обработок с применением БАС, а конкретно параметры раствора на выходе из электроактиватора и его режим работы для всех видов химических средств защиты растений: гербицидов, фунгицидов, инсектицидов и десикантов [118–119].

$$
\text{Т1}=\begin{cases}
C(t) = C_0 \cdot e^{-(k_{\text{гидр}}+k_{\text{компл}}+k_{\text{терм}})\cdot t} \\
C(t) = C_0 \cdot e^{-(0{,}1[OH^-]+0{,}05[Ca^{2+}]+0{,}001\cdot e^{-60/RT})\cdot t} \\
C(t) = C_0 \cdot e^{-(0{,}01[OH^-]+0{,}002\cdot e^{-80/RT})\cdot t} \\
C(t) = C_0 \cdot e^{-(0{,}2[OH^-]+0{,}3[Ca^{2+}]+0{,}005\cdot e^{-50/RT})\cdot t} \\
t_{вых} = \left(t_{исх} + \frac{\frac{Q_{ан}}{Q_{кат}}\cdot(1-Y_{опр})}{(K_c-1)}\right)\cdot\frac{V_г}{V_к};\ t_{вых} = 15 \div 25 \\
pH_a = (pH_{нач} - 7{,}5) + (6{,}32 + 0{,}025\text{Q} - 0{,}1735\text{I} + 0{,}0023\ \text{QI} - 0{,}00017Q^2 - 0{,}0068I^2),\ pH_a = 5 \div 7 \\
I = \frac{F\cdot(C_н - C_к)\cdot Q_{ан}}{n\cdot\eta},\ I \to min \\
P_{ан} = \frac{I^2\cdot\theta\cdot L}{C_{кан}\cdot[1+\kappa_t\cdot(t_{вых}-18)]\cdot S_{эл}},\ P_{ан} \to min \\
W_{общ} = \frac{I}{Q}\cdot\left[\frac{X_д\cdot S_д\cdot\delta}{\Delta l_д\cdot\varepsilon^2} + \frac{I\cdot\theta\cdot K_к}{[1+\kappa_t\cdot(t_{вых}-18)]}\cdot\left(\frac{1}{C_{кан}}+\frac{1}{C_{ккат}}\right)\right],\ W_{общ} \to min
\end{cases}
\tag{2.102}
$$

где $t_{вых}$ – температура раствора на выходе, °С; $t_{исх}$ – температура воды на входе в камеры, °С; $Q_{ан}$ и $Q_{кат}$ – производительность анолита и католита, м^3/с; $Y_{опр}$– коэффициент опреснения, о.е.; K_c – коэффициент концентрирования, о.е.; $V_г$ – объем выделяющегося в камерах газа, м^3; $V_к$ – объем камеры, м^3; $pH_{ан}$– водородный показатель анолита; $pH_{нач}$– водородный показатель воды; I– величина силы тока, А; F – число Фарадея, 26,8 А·ч/моль; $C_н$– начальная концентрация раствора, моль/м^3; $C_к$– конечная концентрация раствора, моль/м^3; $Q_{ан}$– производительность анолита, м^3/с; n– число ячеек в электроактиваторе; η – выход по току, при деминерализации пресных вод составляет от 0,85–0,98, при опреснении морской воды 0,7; $P_{ан}$– мощность анодной камеры, Вт; θ – коэффициент зависящий от состава воды и определяемый по известному значению электрической проводимости исходной воды, округленно θ = 5300 моль/(См·м^2); L – длина канала, м; κ_t – температурный коэффициент, κ_t = 0,02 1/°С; $S_{эл}$ – площадь электрода, м^2; $W_{общ}$ – затраты электроэнергии Вт·ч/ м^3; $X_д$– удельная электропроводимость электролита в диафрагме, См/м; $S_д$ – площадь диафрагмы, м^2; δ – объемная пористость диафрагмы, доли единиц; $\Delta l_д$ – толщина диафрагмы, м; ε – коэффициент извилистости пор диафрагмы, показывающий, во сколько раз длина грань ячейки превышает длину диафрагмы; $K_к$ – конструктивный параметр, о.е.; $C_{кан}$ – минерализация на выходе из анодной камеры, моль/м^3; $C_{ккат}$ – минерализация на выходе из катодной камеры, моль/м^3.

Система уравнений позволяет определить эффективный режим управления параметрами электроактиватора для приготовления рабочего раствора наиболее

часто применяемых пестицидов, с оптимальными энергозатратами. Они отражены в восьмом и девятом уравнениях системы (2.179) и позволяют при заданном режиме работы определить мощность электроактиватора и расход электрической энергии, что очень важно при определении экономической эффективности. Система дополнена уравнениями позволяющими учитывать тип применяемого препарата, в том числе для случаев многокомпонентного рабочего раствора, что часто наблюдается при производстве работ.

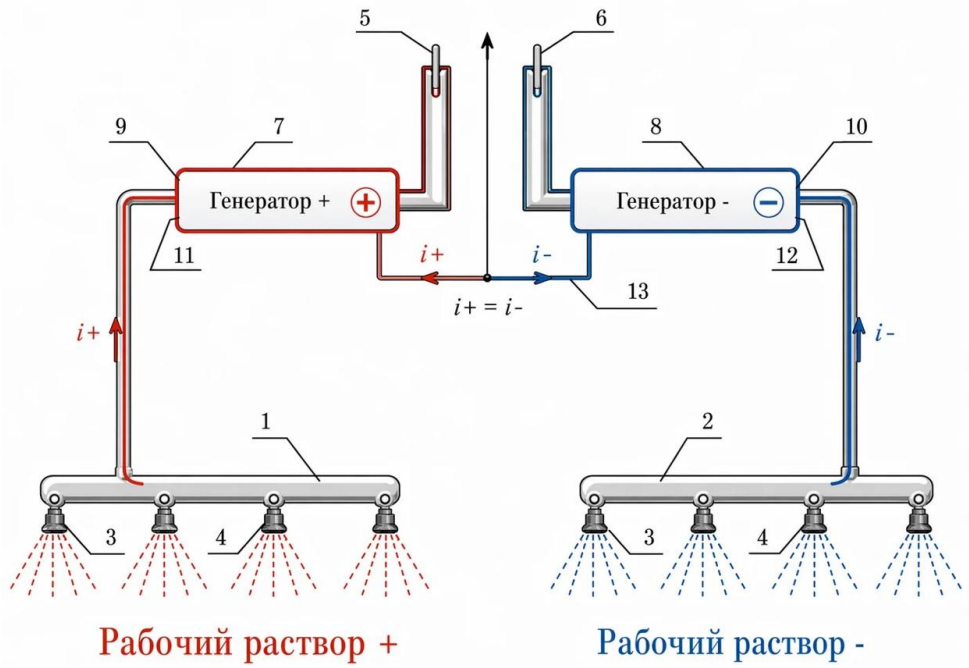
Кроме повышения качества рабочего раствора, так же прибегая к электротехнологическим способам, возможно повысить плотность осаждения капель и снизить потери рабочей жидкости, путем внедрения системы электростатической подзарядки капель. Ожидается, что эффективность оседания, от внедрения данной технологии, повышается до 80%, при этом потери рабочей жидкости снижаются на 60% [6, 72, 186, 207].

В результате литературного обзора по электростатическому опрыскиванию можно выделить три способа электроподзарядки рабочей жидкости: непосредственное приложение высокого потенциала к жидкости; зарядка аэрозоля с помощью коронного разряда; индукционная зарядка аэрозоля [223, 228].

Первый метод предполагает непосредственное приложение высокого потенциала к распыляемой жидкости, что требует больших затрат электроэнергии. Второй – прохождение капель распыляемой жидкости через поле коронного разряда, что может привести к химическим изменениям в распыляемой жидкости. И первый, и второй методы – небезопасны, так как существует высокая вероятность поражения оператора высоким напряжением [92, 213–216].

Третий метод электроподзарядки подразумевает прохождение распыляемой жидкости через электрическое поле высокой напряженности. В отличие от предыдущих, он исключает прямой контакт электрода с распыляемой жидкостью, что снижает шансы поражения оператора высоким напряжением. Процесс электроподзарядки – менее энергозатратный, оборудование не требует сложного конструктивного исполнения. Исследованием технологии и разработкой

конструкций подобных опрыскивателей исследовались в работах [6,145–146, 149, 208–209]. Схема опрыскивателя показана на рисунке 2.27.



1, 2 – блок распылителей; 3 – распылитель; 4 – электрод; 5, 6 – аккумулятор; 7, 8 – генератор высокого напряжения; 9, 10 – низковольтный выход генератора; 11, 12 – высоковольтный выход генератора; 13 – соединение выводов генераторов и корпуса

Рисунок 2.27 - Схема электростатического опрыскивателя

Представим векторное уравнение сил уравнением движения заряженной капли в общем виде:

$$m_{\text{к}} \frac{d\vec{v}_{\text{к}}}{dt} = \vec{F}_{\text{т}} + \vec{F}_{\text{аэр сопр}} + \vec{F}_e \qquad (2.103)$$

где $m_{\text{к}}$ – масса капли, кг; $\vec{v}_{\text{к}}$ – вектор скорости капли, м/с; t – время, с; $\vec{F}_{\text{т}}$ – сила тяжести, Н; $\vec{F}_{\text{аэр сопр}}$ – сила аэродинамического сопротивления, Н; $\vec{F}_e$ – электростатическая сила, Н.

Заряд, приобретаемый каплей, определится по выражению:

$$q_{\text{к}} = 4\pi\varepsilon_0 r_{\text{к}} V k_c \qquad (2.104)$$

где $q_{\text{к}}$ – заряд капли, Кл; $\varepsilon_0 = 8{,}854 \cdot 10^{-12}$ – диэлектрическая проницаемость вакуума, Ф/м; $r_{\text{к}}$ – радиус капли, м; V – напряжение на электроде, В; k_c – геометрический коэффициент (1,5–2,5), ед.

Максимальный заряд, который может удерживать капля без распада можно определить через предел устойчивости (критерий Рэлея):

$$q_{\max} = 8\pi\sqrt{\gamma\varepsilon_0 d_к^3} \quad (2.105)$$

где γ – поверхностное натяжение жидкости (0,065–0,075), Н·м$^{-1}$.

Условие стабильности работы:

$$q_к \leq 0{,}7 q_{\max} \quad (2.106)$$

Ключевая характеристика, определяющая способность капли отклоняться под действием электростатического поля и преодолевать аэродинамические силы – удельный заряд, т.е. количество электрического заряда на единицу массы капли:

$$q_у = \frac{q_к}{m_к} = \frac{3\varepsilon_0 V k_c}{\rho_ж d_к^2} \quad (2.107)$$

Оптимальный диапазон для растениеводства: 0,7 ÷ 1,5 Кл/кг.

Сила тяжести, действующая на каплю может быть рассчитана:

$$\vec{F}_т = m_к\vec{g} = \frac{4}{3}\pi d_к^3 \rho_ж \vec{g} \quad (2.108)$$

Сила аэродинамического сопротивления определяется оп выражению:

$$\vec{F}_{аэр\ сопр} = \frac{1}{2} C_к \rho_в A_к \mid \vec{v}_r \mid \quad (2.109)$$

где $C_к$ – коэффициент лобового сопротивления, ед; $A_к = \pi r_к^2$ – площадь поперечного сечения капли, м^2; $\vec{v}_r$ – вектор относительной скорости, м/с.

Вектор относительной скорости равен:

$$\vec{v}_r = \vec{v}_к - \vec{v}_в \quad (2.110)$$

Где $\vec{v}_к$ – вектор скорости капли, м/с; $\vec{v}_в$ – вектор скорости воздуха, м/с.

Модуль относительной скорости определяется:

$$\mid \vec{v}_r \mid = \sqrt{(u_к - u_в)^2 + (v_к - v_в)^2 + (w_к - w_в)^2} \quad (2.111)$$

где $u_к, v_к, w_к$ – компоненты скорости капли по осям X, Y, Z, м/с; $u_в, v_в, w_в$ – компоненты скорости воздуха по осям X, Y, Z, м/с.

Коэффициент сопротивления для сферической капли:

$$C_к = \frac{24}{Re}(1{+}0{,}15 Re^{0.687}) \text{для } Re < 800 \quad (2.112)$$

Электростатическая сила:

$$\vec{F}_e = q_к \vec{E} \tag{2.113}$$

где $\vec{E}$ – вектор напряженности электростатического поля ($\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$), В/м.

Система дифференциальных уравнений движения капли в проекциях на оси координат имеет вид, ось X (поперечное направление):

$$\frac{du_d}{dt} = -\frac{3\rho_в C_к}{8\rho_к d_к}(u_к - u_в) \mid \vec{v}_r \mid + \frac{q_к}{m_к} E_x \tag{2.114}$$

Ось Y (продольное направление):

$$\frac{dv_к}{dt} = -\frac{3\rho_в C_к}{8\rho_к d_к}(v_к - v_в) \mid \vec{v}_r \mid + \frac{q_к}{m_к} E_y \tag{2.115}$$

Ось Z (вертикальное направление):

$$\frac{dw_к}{dt} = -g - \frac{3\rho_в C_к}{8\rho_к d_к}(w_к - w_в) \mid \vec{v}_r \mid + \frac{q_к}{m_к} E_z \tag{2.116}$$

Модель электростатического поля представлена распределением горизонтальной вертикальными компонентами (метод изображений):

Горизонтальная компонента поля:

$$E_x(x,z) = \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon_0}\left[\frac{x}{x^2+(H-z)^2} - \frac{x}{x^2+(H+z)^2}\right] \tag{2.117}$$

Вертикальная компонента поля:

$$E_z(x,y) = \frac{\sigma}{2\pi\varepsilon_0}\left[\frac{H-z}{x^2+(H-y)^2} - \frac{H+z}{x^2+(H+y)^2}\right] \tag{2.118}$$

где σ – поверхностная плотность заряда, Кл/м²; H – высота полета БАС, м; x – поперечная координата, м; y – продольная координата, м; z – вертикальная координата ($0 \le z \le H$), м.

Проведем связь параметров поля с характеристиками системы, поверхностная плотность заряда σ может быть выражена:

$$\sigma = \frac{I_э t_{раб}}{S_р} \tag{2.119}$$

где $I_э$ – ток эмиссии с электродов, А; $t_{раб}$ – время работы, с; $S_р$ – эффективная площадь системы распыления, м².

Модель взаимодействия капли с растительной поверхностью определим через энергетический критерий осаждения и эффективность улавливания капли. Капля осаждается на поверхности, если:

$$\frac{1}{2} m_{\text{к}} v_n^2 < \frac{q_{\text{к}}^2}{16\pi\varepsilon_0 r_{\text{к}}(1 + k_{\text{шп}})} \tag{2.120}$$

где v_n – нормальная составляющая скорости капли при контакте, м/с; $k_{\text{шп}}$ – коэффициент, учитывающий шероховатость поверхности, о.е., 0,1–0,3.

Эффективность улавливания рассчитывается по выражению:

$$\eta = \eta_0 \exp\left[-\varpi(\text{Stk} - \text{Stk}_{\text{крит}})^2\right] \tag{2.121}$$

где $\eta_0 = 0{,}8 - 0{,}9$ – максимальная эффективность улавливания; ϖ – параметр

Критерии оптимальности обработки следующие: эффективность осаждения $\geq 70\%$, расход рабочего раствора ≤ 15 л/га; энергопотребление ≤ 100 кДж/га; производительность ≥ 2 га/ч.

В результате получена система уравнений $T2$. Полученная система уравнений показывает, что решение не сводится к простому «притяжению». Это динамическая, сильно нелинейная система, где электростатика конкурирует с турбулентным потоком от винтов, удельный заряд является ключевым параметром, который нужно балансировать с размером капли, геометрия поля и воздушный след БАС определяют конечное распределение.

$$T2 = \begin{cases} m_{\text{к}} \dfrac{d\vec{v}_{\text{к}}}{dt} = \vec{F}_{\text{т}} + \vec{F}_{\text{аэр сопр}} + \vec{F}_e \\ q_{\max} = 8\pi\sqrt{\gamma\varepsilon_0 d_{\text{к}}^3};\ d_{\text{к}} = 50 \div 300 \\ \eta = \eta_0 \exp\left[-\varpi(\text{Stk} - \text{Stk}_{\text{крит}})^2\right];\ E = 0{,}7 \div 0{,}8\ ,\ C_{\text{факт}} = 20 \div 100 \end{cases} \tag{2.122}$$

Для инженерной практики наиболее важны экспериментальное определение оптимального отношения заряда и массы капли для конкретного БАС и препарата, создание устойчивой к помехам системы генерации высокого напряжения, разработка интеллектуальных алгоритмов, изменяющих скорость и высоту в полете в зависимости от датчиков (лидар, оптические) для адаптации к структуре поля и фазе растения. Модель позволяет проводить виртуальные испытания, оптимизировать конструкцию и режимы полета до дорогостоящих натурных экспериментов, что является основой современного инженерного подхода.

В ходе теоретических исследований определили оптимальные параметры системы электростатического опрыскивания: зарядное напряжение – 9 кВ, давление насоса – 0,3 МПа. Теоретические расчеты показали, что наилучший результат осаждения капель будет достигнут при опрыскивании с высоты 2 м. При электростатическом опрыскивании средняя плотность осаждения капель на мишенях увеличится на верхней части на 16,1 ед./см^2 (на 14%), на средней части на 28 ед./см^2 (на 33%). Применение системы электростатического опрыскивания на БАС способно увеличить плотность осаждения капель распыляемой жидкости на 33%.

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

Эффективность растениеводства и, как следствие, деятельность всего сельскохозяйственного предприятия в значительной степени зависят от качества проведения посевных работ и последующего контроля. Для оперативного управления агротехническими процессами критически важно как можно раньше получить объективную количественную оценку результатов посева. Ключевыми задачами такого мониторинга являются определение количества и качества всходов, выявление участков с пропусками или двойниками, выявление зон неравномерного развития, обнаружение очагов, засоренных сорняками, пораженных болезнями или вредителями. Получение данных по этим направлениям на ранних стадиях развития сельскохозяйственных культур позволяет своевременно выполнить корректирующие мероприятия: подсев, полив, обработку средствами защиты растений, подкормку. Для успешного проведения мониторинга необходимо соблюдение ряда условий: съемка должна выполняться в фенологический период, когда всходы представляют собой визуально различимые

отдельные растения; на обследуемом поле должны отсутствовать резкие перепады высот; спектральные характеристики сорной растительности или иных посторонних объектов в рядках должны отличаться от характеристик целевой культуры [69, 164].

Применение БАС для решения задач мониторинга требует определения наилучших параметров съемки, к которым относятся: выбор скорости и высоты полета; настройка параметров бортовой съемочной аппаратуры (фокусное расстояние, разрешение), обеспечивающих требуемую точность распознавания; определение оптимальных сроков проведения съемки с учетом фаз развития культуры; верификация данных дистанционного зондирования наземными методами; сравнение результатов анализа аэрофотоснимков с фактическим состоянием посевов. Решение этих задач лежит в основе планирования эффективного полетного задания. Важно представить математические выражения для определения ключевых параметров аэрофотосъемки с БАС, включая расчет пространственного разрешения, перекрытий снимков, количества кадров, времени и энергозатрат на обследование заданного участка [53, 70, 172].

В настоящее время известен подход к оценке вероятности распознавания объектов на изображении, предполагающий использование следующего выражения [30]:

$$K_{\text{расп}} = e^{-(\epsilon\frac{GSD}{S_{\text{об}}})^2} \quad (2.123)$$

где $K_{\text{расп}}$ – искомая вероятность распознавания, о.е.; ϵ – коэффициент распознавания формы, рх/ед; GSD – пространственное разрешение снимка, см/рх; $S_{\text{об}}$ – характерный размер объекта в плане, см.

Масштаб определяет, насколько большая область покрыта фотографией и с какой детализацией. Понимание масштаба является ключом к выбору и получению подходящей аэрофотосъемки для конкретной задачи. Если известны фокусное расстояние камеры и высота полета над поверхностью, масштаб можно рассчитать по следующей формуле [81]:

$$\text{Масштаб} = \frac{f}{h_n} \quad (2.124)$$

где f – фокусное расстояние камеры, мм.

При обработке цифровых изображений большое значение на точность оказывает показатель GSD, расчет которого при известной высоте полета можно выполнить по следующему выражению:

$$GSD = \frac{h_n}{l_x} \quad (2.125)$$

где l_x – размер снимка камеры, м.

Учитывать показатель GSD важно, так как это поможет сохранить баланс между нужным качеством снимков и высотой полета, а высота полета в свою очередь отразит режим полета и оптимальные технические характеристики, предъявляемые к БАС (время полета на одном заряде, скорость и т.п.). GSD является ключевым ограничивающим фактором точности при картировании с БАС, в то же время GSD влияет на то, какой объем данных (ГБ) будет содержать полет и сколько времени этот полет будет выполнятся [170].

Немаловажно так же учитывать характеристику оптического оборудования для картирования, так как технические характеристики оптики влияют на параметры съемки (таблица 2.19).

Таблица 2.19 - Вегетационные индексы, рекомендуемая техника и GSD для основных возделываемых культур

Фаза роста	Оптимальные индексы	Рекомендуемая техника	Оптимальный GSD, см/px	Примечания
RGB и мультиспектральные камеры				
Пшеница и Ячмень				
Всходы	SAVI, MSAVI	БАС с RGB–камерой	1–3 см	Высокое разрешение для редких всходов
Кущение	NDVI, GNDVI	Спутники (Sentinel–2)	10 см	Подходит для больших площадей
Выход в трубку	NDRE, CI	БАС+Red Edge (MicaSense Altum)	5–10 см	Требуется точность для азотного анализа
Колошение	NDRE, PRI	Наземные спектрометры (ASD FieldSpec)	1–5 см	Точечные замеры высокой точности
Созревание	VARI, NDVI	БАС с RGB–камерой	2–5 см	Достаточно RGB для оценки спелости

Фаза роста	Оптимальные индексы	Рекомендуемая техника	Оптимальный GSD, см/px	Примечания
Подсолнечник				
Всходы	SAVI, EVI	БАС+ Parrot Sequoia	3–5 см	Учет почвенного фона
Бутонизация	NDRE, CI	Спутники (PlanetScope)	3 м	Частые снимки, но низкое разрешение
Цветение	NDWI, PRI	БАС+Тепловизоры (FLIR)	10–20 см	Тепловые данные + вегетационные индексы
Созревание	PSRI, VARI	БАС с RGB–камерой	5–10 см	VARI можно получить с RGB камеры
Кукуруза				
3–6 листьев	NDVI, GNDVI	БАС с RGB–камерой (DJI Matrice T30)	10 м	Достаточно для раннего мониторинга
Выход в трубку	NDRE, CI	БАС+Red Edge (MicaSense Altum)	5–8 см	Для азотных подкормок
Цветение	NDWI, PRI	БАС+ Тепловизоры (DJI Mavic 3T)	10–15 см	Комбинация NDWI + тепловизора
Созревание	PSRI, NDRE	БАС+Red Edge (MicaSense Altum)	20–50 см	Интеграция с уборочной техникой
Соя				
Ветвление	NDVI, GNDVI	БАС+Red Edge (DJI Mavic 3 Multispectral)	3–7 см	Баланс цена/качество
Цветение	NDRE, PRI	Наземные датчики (Yara N–Sensor)	1–5 см	Точечный контроль азота
Налив бобов	NDWI, PSRI	БАС (WingtraOne)	5–10 см	Большой охват за полет
Рис				
Кущение	NDVI, GNDVI	Спутники (Sentinel–1 SAR)	5–20 м	SAR работает в любую погоду
Колошение	NDWI, PRI	БАС+Red Edge (DJI Mavic 3 Multispectral)	10–30 см	Совмещение с поливом
Созревание	PSRI, VARI	БАС с RGB–камерой	5–15 см	Быстрая оценка спелости
Гиперспектральные камеры				
Всходы (все культуры)	–	Гиперспектральный сенсор	10–30 см	3–6 м/с
Анлиз азотного состояния	–	БАС + VNIR–гиперспектрометр	5–15 см	3–5 м/с
Очаги поражения культуры	–	SWIR–гиперспектрометр	10–20 см	3–5 м/с

Фаза роста	Оптимальные индексы	Рекомендуемая техника	Оптимальный GSD, см/px	Примечания
Лидары				
Ранжирование рельефа	–	DJI Zenmuse L2, RIEGL	50–100 м	5–10 м/с
Детальный профиль растений	–	АГМ–МС3, DJI L2	30–50 м	3–5 м/с
Биомасса	–	БАС + лидар	40–80 м	5–8 м/с
Тепловизор				
Наличие влаги	–	DJI Mavic 3T, FLIR	10–20 см	40–80 м
Очаги болезней	–	Viewpro H30T	5–10 см	20–40 м
Влажность перед уборкой	–	Q20T	20–50 см	80–150 м

Зная характеристики матрицы камеры, вычислить GSD можно так же по выражениям:

$$GSD_{\text{x}} = \frac{h_n \cdot M_x}{f \cdot L_x} \cdot 100 \qquad (2.126)$$

$$GSD_y = \frac{h_n \cdot M_y}{f \cdot L_y} \cdot 100 \qquad (2.127)$$

где M_x и M_y – ширина и длина матрицы, соответственно, мм; L_x и L_y – размер кадра, px (рисунок 2.28).

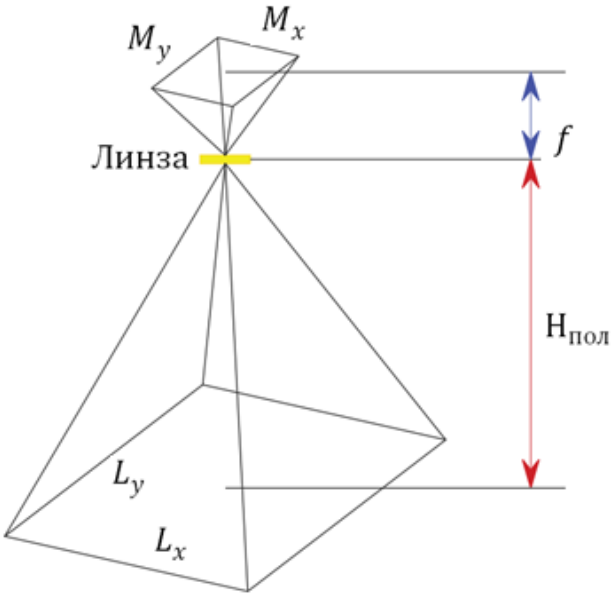


Рисунок 2.28 - Изображение связи ширины и длины матрицы на размер кадра

Для тепловизоров выражение для GSD имеет вид:

$$GSD = \frac{h_n \cdot IFOV}{100} \quad (2.128)$$

где $IFOV$ – пространственное разрешение тепловизора, мрад.

Для лидаров эквивалентное пространственное разрешение рассчитывается по выражению:

$$GSD = \frac{v}{PRF} \quad (2.129)$$

где PRF – частота импульсов, кГц.

Характеристики оптических устройств на некоторых моделях БАС представлена в Таблице 2.20:

Таблица 2.20 - Характеристики оптических устройств на БАС

Модель	Канал, нм	Макс. размер изображения	Скорость затвора	Фокусное расстояние, мм	Разрешение канал/ RGB, МП	Матрица
DJI Phantom 4 Gimbal Camera		4864 x 3648 (4:3) 5472 x 3648 (3:2)	8–1/8000 с	20	12	1/2.3” CMOS
DJI Phantom 4 Multispectral	450 560 650 730 840	1600×1300 (4:3,25)	1/100–1/10000 с 1/100–1/20000 с	5,74	5x2,08 1x	1/2.9” CMOS
DJI Mavic 3		4864 x 3648	2–1/8000 с	24	20	4/3 CMOS
DJI Mavic 3 Multispectral	560 650 730 860	2592x1944 5280x3956	1/30~1/12800 с 8–1/8000 с	25 24	5x5 1x20	1/2,8 CMOS 4/3″ CMOS
DJI Zenmuse X5		4608x3456	8 — 1/8000 с	24/35/50	24	4/3" CMOS
DJI Zenmuse X7		6016 x 4008	1/8000 – 8 с	24/35/50	24	4/3" CMOS
DJI Zenmuse P1		8192 x 5460	1/8000–1 с	24/35/50	45	Полнокадровая матрица
DJI Mavic 2 Enterprise Dual	8–14 мкм	4056×3040 (4:3); 4056×2280 (16:9)	8–1/8000 с	24	12	1/2,3” CMOS

Модель	Канал, нм	Макс. размер изображения	Скорость затвора	Фокусное расстояние, мм	Разрешение канал/ RGB, МП	Матрица
		640×480 (4:3) 640×360 (16:9)				
Viewpro H30T	905	640x512	1/10000 – 1c	19	4,17	1/1,8 CMOS
Q20T	905	3840x2160	1/10000 c	3,8	8,51	SONY 1/2.5" CMOS
DJI Zenmuse L2	905	5280x3956 (4:3)	2–1/8000 c	24	20	4/3 CMOS
Parrot SEQUOIA	550 660 735 790	1280 x 960, 4608x3456	1/10000 – 1c	4,88	16	
MicaSense Altum	475 560 668 717 840			8/1,77	3,2/12, 4	
MicaSense Altum–PT	475 560 668 717 842			8/1,77	3,2/12, 4	

Длина l_x и ширина l_y изображения на местности могут быть выражены по формулам (рисунок 2.29):

$$l_x = \frac{L_x \cdot GSD}{100} \tag{2.130}$$

$$l_y = \frac{L_y \cdot GSD}{100} \tag{2.131}$$

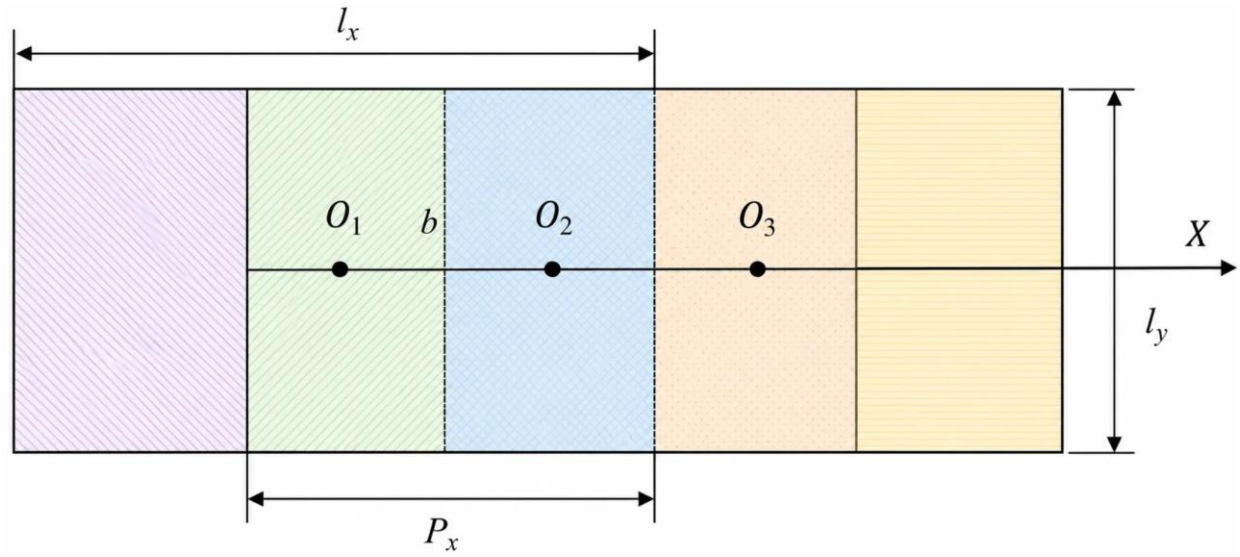


Рисунок 2.29 - Проекция снимка на поверхности с центрами фотографии и перекрытиями

Масштаб изображения так же можно привести к величине GSD следующей зависимостью:

$$\frac{f}{h_n} = \frac{S_{px}}{GSD} \tag{2.132}$$

где S_{px} – размер пикселя матрицы, мм.

$$GSD = \frac{h_n \cdot S_{px}}{f} \tag{2.133}$$

Знание размера пикселя полезно для определения выдержки съемки, так как чем мельче пиксель, тем заметнее на снимках проявляется дрожание камеры. Так же при сопоставлении камер размер пикселя даст понимание, какая из них обладает большей плотностью пикселей, а, значит, обеспечивает лучшую детализацию и больше подходит для съёмки удалённых объектов. Размер пикселя определяется выражениями:

$$S_{px} = \frac{M_x}{L_x} \cdot 1000 \tag{2.134}$$

$$S_{py} = \frac{M_y}{L_y} \cdot 1000 \tag{2.135}$$

где частное 1000 – перевод результата в микрометры (микроны).

Так же размер пикселя можно выразить, зная кроп–фактор камеры K_f и разрешение камеры. Кроп–фактор покажет отношение между линейными

размерами полного 35–мм кадра и кадра уменьшенного формата. Кроп–фактор, равный 1, соответствует полному кадру (36 × 24 мм).

$$S_{px} = \frac{29{,}4}{K_f \cdot \sqrt{N}} \tag{2.136}$$

где N – это общее количество мегапикселей камеры.

При планировании работ по дистанционному мониторингу или картированию стоит учесть области перекрытий фотографий и время записи информации T_{RF} с цифровой камеры на накопитель. Поэтому минимальное расстояние между кадрами B_{min} для цифровой камеры в первую очередь зависит от ее технических характеристик и скорости беспилотного летательного аппарата:

$$B_{min} = \upsilon \cdot T_{RF} \tag{2.137}$$

где B_{min} – расстояние между кадрами, м; T_{RF} – время записи информации, с.

Для гиперспектральных камер более жесткие ограничения:

$$B_{min} = \upsilon \cdot (T_{RF} + t_{\text{кан}}) \tag{2.138}$$

где $t_{\text{кан}}$ – время съемки канала, с.

При обработке изображений очень маленькие перекрытия могут давать большую погрешность в точности модели, а большие перекрытия – нерационально тратят ресурс батареи и увеличивают объем информации. Рекомендованные перекрытия между соседними снимками в равнинных условиях съемки находятся в пределах 55–75%, в горных – до 80–90%. Таким образом, расстояние между снимками B_x с учетом продольного перекрытия определяется по следующей формуле:

$$B_x = l_x \cdot (1 - \frac{P_x}{100}) \tag{2.139}$$

где P_x – продольное перекрытие, %.

Расстояние между снимками с учетом поперечного перекрытия может быть найдено:

$$B_y = l_y \cdot (1 - \frac{P_y}{100}) \tag{2.140}$$

где P_y – поперечное перекрытие, %.

При проведении аэрофотосъемки с применением БАС, для того чтобы обеспечить необходимое продольное перекрытие между соседними снимками одного маршрута, должно соблюдаться следующее ограничение:

$$B_{min} \geq B \tag{2.141}$$

Ширина маршрута на местности $L_{\text{М}}$ зависит от ширины кадра l_y применяемой в комплексе с БАС цифровой камеры.

$$L_{\text{М}} = l_y \tag{2.142}$$

Для лидаров ширина маршрута определяется углом сканирования по выражению:

$$L_{\text{М}} = 2 \cdot h_n \cdot tan(\frac{\gamma_{\text{лид}}}{2}) \tag{2.143}$$

где $\gamma_{\text{лид}}$ – угол сканирования лидара, град.

Длина участка поля a равна длине среднего маршрута в продольном направлении от левого края первого аэрофотоснимка до правого края последнего аэрофотоснимка. Ширину участка b измеряют в поперечном направлении посередине от верхней стороны аэрофотоснимка первого маршрута до нижней стороны аэрофотоснимка последнего маршрута. Таким образом, количество снимков в маршруте N_{CH} определяется как отношение длины участка a к расстоянию между снимками с учетом продольного перекрытия.

$$N_{CH} = \left\lceil \frac{a}{B_x} \right\rceil + 1 \tag{2.144}$$

Количество же маршрутов будет больше на единицу отношения ширины участка к расстоянию между смежными маршрутами:

$$N_M = \left\lceil \frac{b}{B_y} \right\rceil + 1 \tag{2.145}$$

Количество снимков на участок $N_{\text{уч}}$ определяют как общее количество снимков по всем маршрутам аэрофотосъемки:

$$N_{\text{уч}} = N_M \cdot N_{CH} \tag{2.146}$$

Объем полученной информации можно рассчитать по формуле:

$$D_{\text{орто}} = N_{\text{уч}} \cdot D_{\text{ф}} \tag{2.147}$$

где $D_{\text{орто}}$ – объём данных по ортофотоплану, ГБ; $D_{\text{ф}}$ – объем данных одной фотографии, ГБ.

Для мультиспектральной и гиперспектральной съемки объем данных существенно больше и находится по выражению:

$$D_{\text{орто}} = N_{\text{уч}} \cdot N_{\text{кан}} \cdot D_{\text{ф}} \quad (2.148)$$

где $N_{\text{кан}}$ – число спектральных каналов, ед.

Для лидаров определяется объем данных (облако точек) по формуле:

$$D_{\text{орто}} = \frac{a \cdot b \cdot D_{\text{точ}} \cdot BPP_{\text{точ}}}{10^9} \quad (2.149)$$

где $D_{\text{точ}}$ – плотность точек, шт/м²; $BPP_{\text{точ}}$ – размер точки, байт/ точку.

При оценке эффективности и экономической целесообразности применения БАС для мониторинга, важно определить сколько времени потребуется на аэрофотосъемку участка $t_{\text{уч}}$. Это также позволит оценить в какой период времени лучше проводить данные работы:

$$t_{\text{уч}} = \frac{N_M \cdot a + (N_M - 1) \cdot 3B_x)}{\upsilon} + t_{\text{вз}} + t_{\text{пос}} \quad (2.150)$$

где $t_{\text{вз}}$ – время взлета, с; $t_{\text{пос}}$ – время посадки, с.

С учетом направления облета, скорости и направления ветра уравнение 2.125 примет вид [196]:

$$t_{\text{уч}} = \frac{N_M \cdot a}{\upsilon + u_n \cos(\varphi_{\text{БПЛА}} - \varphi_{\text{в}})} + \frac{(N_M - 1) \cdot 3B_x}{\upsilon_{\text{р}}} + \frac{h_n}{\upsilon_{\text{вз}}} + \frac{h_n}{\upsilon_{\text{пос}}} \quad (2.151)$$

где $\varphi_{\text{БПЛА}}$ – курсовой угол БПЛА, град; $\varphi_{\text{в}}$ – угол направления ветра, град; $\upsilon_{\text{р}}$ – скорость БПЛА на разворотах, м/с; $\upsilon_{\text{вз}}$ – скорость БПЛА при взлете, м/с; $\upsilon_{\text{пос}}$ – скорость БПЛА при посадке, м/с.

Для оценки времени полёта с учётом скорости и направления ветра и заряда АКБ можно пользоваться выражением:

$$W_{\text{уч}} = P_{\text{пол}} \cdot t_{\text{уч}} \cdot (1 - k_a \cdot \frac{u_n \cos(\varphi_{\text{БПЛА}} - \varphi_{\text{в}})}{2\upsilon}) \leq W_{\text{б}} \quad (2.152)$$

где $W_{\text{уч}}$ – энергия, требуемая для полета, Дж; $P_{\text{пол}}$ – мощность БПЛА во время полета, Вт; k_a – эмпирический коэффициент (0,3–0,7); $\upsilon_{\text{в}}$ – скорость ветра, м/с; $W_{\text{б}}$ – номинальная запасаемая в батарее энергия, Дж.

С учетом использования на БПЛА дополнительного оборудования общее энергопотребление $P_{\text{общ}}$ рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{общ}} = P_0 + P_{\text{д}} + P_{\text{охл}} \tag{2.153}$$

где $P_{\text{д}}$ – мощность сенсора, Вт; $P_{\text{охл}}$ – мощность системы охлаждения (для охлаждаемых тепловизоров и лидаров), Вт.

Параметры съемки по разным типам сенсоров приведены в таблице 2.21.

Таблица 2.21 - Параметры съемки по типам сенсоров

Тип камеры	GSD, см/px	Перекрытие, %	Скорость, м/с	Высота, м	Объем данных, ГБ/га	Энергопотребление, Вт
RGB	1–5	60–70	5–10	30–100	0,1–0,5	5–15
Мультиспектральный	3–10	70–80	5–8	40–120	0,2–1,0	10–20
Гиперспектральный	10–30	75–85	3–6	50–150	2–10	30–70
Лидар	5–20 (плотн. точек)	–	5–10	30–120	0,5–5 (облако)	40–120
Тепловизор	10–50	70–80	5–10	30–150	0,05–0,2	10–40

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

$$C = \begin{cases} K_{\text{расп}} = e^{-(\epsilon\frac{GSD}{S_{\text{об}}})^2};\ K_{\text{расп}} \to max \\ GSD = \dfrac{h_n \cdot M}{f \cdot L}, \quad GSD = \dfrac{h_n \cdot IFOV}{100}, \quad GSD = \dfrac{v}{PRF};\ GSD = 0{,}5 \div 7 \\ l = \dfrac{L \cdot GSD}{100} \\ B_x = l_x \cdot \left(1 - \dfrac{P_x}{100}\right), B_y = l_y \cdot \left(1 - \dfrac{P_y}{100}\right), L_{\text{М}} = 2 \cdot h_n \cdot tan\left(\dfrac{\gamma_{\text{лид}}}{2}\right);\ h_n = 15 \div 150 \\ N_{\text{уч}} = N_M \cdot N_{CH};\ N_{\text{уч}} \to min \\ D_{\text{орто}} = N_{\text{уч}} \cdot D_{\text{ф}}, D_{\text{орто}} = N_{\text{уч}} \cdot N_{\text{кан}} \cdot D_{\text{ф}}, D_{\text{орто}} = \dfrac{a \cdot b \cdot D_{\text{точ}} \cdot BPP_{\text{точ}}}{10^9} \\ t_{\text{уч}} = \dfrac{N_M \cdot a}{v + u_n \cos(\varphi_{\text{БПЛА}} - \varphi_{\text{в}})} + \dfrac{(N_M - 1) \cdot 3B_x}{v_{\text{р}}} + \dfrac{h_n}{v_{\text{вз}}} + \dfrac{h_n}{v_{\text{пос}}};\ t_{\text{уч}} \to min \\ W_{\text{уч}} = P_{\text{пол}} \cdot t_{\text{уч}} \cdot \left(1 - k_a \cdot \dfrac{v_{\text{в}} \cos(\varphi_{\text{БПЛА}} - \varphi_{\text{в}})}{2v}\right);\ W_{\text{уч}} \le W_{\text{б}} \end{cases} \tag{2.154}$$

Современные БАС оснащены системами компьютерного управления и приемником глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС, GPS, Beidou и Galileo, позволяющим направлять БПЛА по заданному маршруту.

Поэтому проблема оптимизации маршрута наиболее результативно может быть решена с использованием спутниковой карты и компьютерной оптимизации длины траектории движения БАС, энергии, затраченной на заряд АКБ и соответственно количество АКБ, времени остановок для и общего времени полета. Для оперативного определения высоты полета и вероятности распознавания объекта на этой высоте для различных камер и размера объекта распознавания, возможно воспользоваться номограммой (рисунок 2.30).

При работе с номограммой можно применить три подхода:

Подход 1. Известен объект → подбирается камера и высота полета. Шаг 1. Задаётся размер объекта (например, всход пшеницы - 2 см); Шаг 2. Задаётся требуемую вероятность распознавания (например, 0,85); Шаг 3. По номограмме находится требуемый GSD.

Подход 2. Задана высота и камера → оценивается вероятность распознавания. Шаг 1. По высоте и камере вычисляется GSD. Шаг 2. На номограмме проводится линия от GSD к размеру объекта. Шаг 3. По номограмме находится вероятность распознавания.

Подход 3. Выбор оптимальной камеры. Шаг 1. По номограмме определяется сочетание высоты и GSD для $P_{\text{расп}} \geq 0{,}9$. Шаг 2. Подбирается тип камеры (RGB, мультиспектр, гиперспектр).

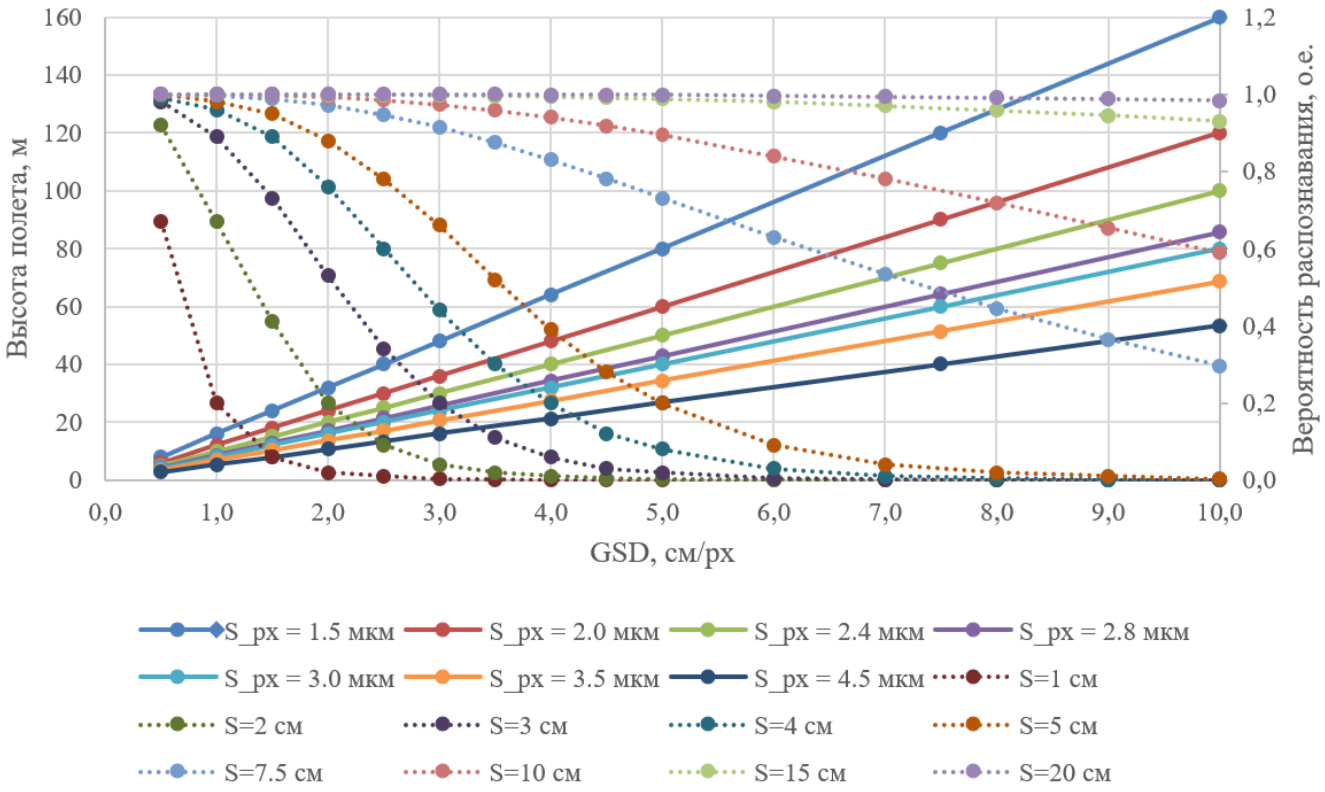


Рисунок 2.30 - Номограмма определения параметров аэрофотосъемки при различных значениях пикселя и размера объекта

Номограмма определения параметров аэрофотосъемки при различных значениях пикселя и размера объекта это быстрый инженерный инструмент, заменяющий расчёт по формулам при планировании съёмки под конкретную культуру и фазу развития.

Внедрение БАС представляет собой стратегическое решение при реализации концепции цифрового земледелия, однако его эффективность напрямую зависит от корректного расчёта эксплуатационных параметров [21, 25, 58]. Определение параметров силовой установки и динамики полёта зависит от физических параметров (ускорение свободного падения, плотность воздуха) и конструктивных параметров БАС (масса аппарата, количество винтов, радиуса винта, шага винта, плеча, ометаемой площади винта, обтекаемости фюзеляжа). Все эти параметры напрямую влияют на параметров полетного задания [188]. Мощность, потребляемая БАС может быть определена по циклограммам нагрузки [55], а мощность, необходимая для висения P_p может быть рассчитана по формуле:

$$P_p = k_h \frac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho_{\text{в}} \cdot N_{\text{лоп}} \cdot S}} \quad (2.155)$$

где k_h – технологический коэффициент БПЛА (для малых БПЛА 1,6 – 2,2, для грузоподъемных БПЛА 1,5–1,8), о.е.

Мощность P_r, необходимая для преодоления аэродинамического сопротивления при известной скорости полета тогда может быть рассчитана по формуле [10, 210]:

$$P_r = \frac{1}{2}\rho_{\text{в}} v^2 S C_0 + \frac{2{P_p}^2 K_{1\text{a}}}{\rho_{\text{в}} \cdot v \cdot S} \quad (2.156)$$

где C_0 – сила трения при нулевой силе подъема из–за трения о корпус БПЛА, Н; $K_{1\text{a}}$ – коэффициент тяги, о.е.

Потребляемую мощность БПЛА во время полета $P_{\text{пот}}$ можно посчитать по формуле:

$$P_{\text{пот}} = \left(T \cdot v_i + F_{\text{сопр}} \cdot v\right) + P_r \quad (2.157)$$

Для определения конструктивного параметра пропеллера введём в расчет аэродинамическое качество винта $Q_{\text{эф}}$, учитывающее его форму. Часто качество винта оценивается через соотношение коэффициентов тяги $K_{1\text{a}}$ и мощности $K_{2\text{a}}$, зависящие от формы лопастей, их числа, кинематического параметра λ и числа Рейнольдса.

Коэффициентов тяги винта $K_{1\text{a}}$ можно рассчитать по формуле:

$$K_{1\text{a}} = \frac{T}{\rho_{\text{в}} \cdot \nu^2 \cdot D^4} \quad (2.158)$$

где D – диаметр винта, м.

Коэффициентов мощности $K_{2\text{a}}$ можно рассчитать по формуле:

$$K_{2\text{a}} = \frac{P_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} \cdot \nu^3 \cdot D^5} \quad (2.159)$$

где $P_{\text{в}}$ - потребляемая мощность на валу, Вт.

Кинематический параметр λ можно рассчитать по выражению:

$$\lambda = \frac{v}{\nu \cdot D} \quad (2.160)$$

Показатель $Q_{эф}$ является безразмерным коэффициентом, который позволяет сравнивать различные винты, учитывая форму их лопастей и его можно рассчитать по выражению [105, 17]:

$$Q_{эф} = \lambda \cdot \frac{K_{1а}^{\frac{3}{2}}}{K_{2а}} \tag{2.161}$$

Учитывается геометрия лопасти: профиль, хорда, углы установки сечений. С ростом числа лопастей полная тяга растет, но из-за взаимного влияния лопастей (индуктивных потерь) удельное качество каждой лопасти и общее аэродинамическое качество винта $Q_{эф}$ могут снижаться. Так же влияют силы вязкого трения среды. При малых значения критерия Рейнольдса (маленькие винты, разреженный воздух) преобладает трение, коэффициент мощности $K_{2а}$ растет, а качество $Q_{эф}$ резко падает.

Для того что бы оценить эффективность типа конструкции БПЛА в зависимости от количества винтов введем выражение для определения эффективности винта $E_{п}$:

$$E_{п} = \frac{Q_{эф} D}{\sqrt{\frac{m}{n}}} \tag{2.162}$$

Соответственно, эффективность типа конструкции можно определить для любой схемы компоновки БАС. Произведем расчет $E_{п}$ отношением силы тяги и мощности по выражению:

$$E_{п} = \frac{T}{K_{2а}\rho_{в}\frac{(\frac{F}{K_{1а}\rho_{в}})^{\frac{3}{2}}}{D}} = \frac{D K_{1а}^{\frac{3}{2}}}{K_{2а}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{в}}{T}} \tag{2.163}$$

Тогда выражение для эффективности преобразится с учетом $Q_{эф}$:

$$E_{п} = Q_{эф} D \sqrt{\frac{\rho_{в}}{T}} \tag{2.164}$$

Плотность воздуха в условиях полета для условий обработки величина изменяющаяся, и зависит от погодных условий. Плотность воздуха можно рассчитать при помощи уравнения Менделеева–Клапейрона:

$$\rho_{\text{в}} = \frac{p_{\text{атм}} \cdot M}{R \cdot t} \quad (2.165)$$

где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па; M – молярная масса (28,98 г/моль); t – температура воздуха, К.

Отношение M/R – удельная газовая постоянная, для воздуха принимаем – 287 Дж/(кг·К), тогда плотность воздуха вычислим по выражению:

$$\rho_{\text{в}} = 287 \frac{p_{\text{атм}}}{t} \quad (2.166)$$

Подставим это выражение в формулу для вычисления $E_{\text{п}}$:

$$E_{\text{п}} = Q_{\text{эф}} D \sqrt{\frac{p_{\text{атм}} \cdot M}{RtT}} \quad (2.167)$$

Формула для $E_{\text{п}}$ окончательно будет выглядеть так [105]:

$$E_{\text{п}} = 16{,}9 Q_{\text{эф}} D \sqrt{\frac{p_{\text{атм}}}{tT}} \quad (2.168)$$

Общая эффективность применения БАС зависит от конструктивных особенностей и погодных условий.

Основным элементом любого мобильного электрического агрегата является АКБ. В составе БПЛА наибольшую эффективность получили литий–ионные и литий–полимерные типы [8, 64]. Для выбора АКБ или определения его эксплуатационных характеристик определим ток, отдаваемый одной батареей по выражению:

$$I_{\text{б}} = C_{\text{р}} \cdot C_{rate} \quad (2.169)$$

где $I_{\text{б}}$ – ток, отдаваемый в нагрузку одной батареей, А; $C_{\text{р}}$ – номинальная емкость батареи, Ач; C_{rate} – коэффициент разряда (отношение разрядного тока к ёмкостному току $C_{\text{р}}$, 1/ч.

При этом теоретическое время работы $t_{\text{б}}$ при заданном токе и относительная скорость разряда батареи связаны отношением:

$$t_{\text{б}} = \frac{C_{\text{р}}}{I_{\text{б}}} \quad (2.170)$$

В связи с большим количеством внешних факторов, реальное время работы будет примерно на 30% меньше рассчитанного по формуле 2.145. Следует также

учесть, что допустимая глубина разряда батареи еще больше ограничивает время ее работы. Запас энергии в батарее определится по формуле:

$$W_{\text{б}} = U_{\text{бном}} \cdot C_{\text{р}} \quad (2.171)$$

где $W_{\text{б}}$ – номинальная запасаемая в батарее энергия, Втч. $U_{\text{бном}}$ – номинальное напряжение батареи, В.

Емкость литиевой аккумуляторной батареи линейно падает при постоянной скорости разряда; таким образом, формула, описывающая текущее напряжение такой батареи, имеет следующий вид:

$$U_{\text{тек}} = U_{\text{ном}} - \frac{U_{\text{ном}}}{C_0} \cdot (C_0 - C_{\text{ост}}) \quad (2.172)$$

где $U_{\text{тек}}$ – текущее напряжение, выдаваемое батареей, В; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение батареи, В; C_0 – номинальная емкость батареи, мАч; $C_{\text{ост}}$ – текущая емкость батареи, мАч.

Из определения силы электрического тока и с учетом известной емкости батареи, которая определяет ток, отдаваемый батареей в нагрузку в течение 3600 секунд, получим выражение для заряда батареи:

$$Q_{\text{б}} = 3600 \cdot C_{\text{р}} \quad (2.173)$$

где $Q_{\text{б}}$ – заряд батареи, Кл.

Текущее напряжение блока батарей определим по формуле:

$$U_{\text{тек б б}} = U_{\text{тек}} \cdot N_c \quad (2.174)$$

где $U_{\text{тек б б}}$ – текущее напряжение блока батарей, В; N_c – количество батарей в одной из нескольких групп последовательно соединенных батарей.

Тогда емкость и энергия блока батарей равны:

$$C_{\text{б б}} = C_{\text{р}} \cdot N_p \quad (2.175)$$

$$W_{\text{б б}} = W_{\text{б}} \cdot N_c \cdot N_p \quad (2.176)$$

где $C_{\text{б б}}$ – емкость блока батарей, или емкость всего АКБ, Ач; $W_{\text{б б}}$ – энергия блока батарей, Втч; N_p – количество групп соединенных батарей.

Заряд блока батарей определяется по выражению:

$$Q_{\text{сум}} = Q_{\text{б}} \cdot N_c \cdot N_p \quad (2.177)$$

Ток разряда блока батарей и время работы рассчитываются по формулам:

$$I = I_б \cdot N_p \quad (2.178)$$

$$t = t_б \cdot N_p \quad (2.179)$$

Рассчитав технические характеристики, можно определить эксплуатационные, так расчетное время полета можно определить по выражению:

$$t_{рп} = \frac{60 \cdot C_{ост}}{I_п} \quad (2.180)$$

где $t_{рп}$ – полетное время БАС, мин; $I_п$ – ток, потребляемый БАС в полёте, А.

Максимальный ток, отдаваемый батареей при полной нагрузке, определяется по формуле:

$$I_{пmax} = I_{max\ о} + I_д \cdot n \quad (2.181)$$

где $I_{max\ о}$ – максимальный ток, потребляемый различным оборудованием БАС, за исключением двигателей, А; $I_д$ – максимальный ток, потребляемый одним двигателем, А.

Определим количество аккумуляторов по выражению:

$$N_{АКБ} = \left\lceil \frac{I_{пmax}}{I_б} \right\rceil \quad (2.182)$$

Максимальная мощность, потребляемая БАС равна:

$$P_{max} = I_{пmax} \cdot U_{ном} \quad (2.183)$$

Зависимость затрат энергии при различных типах винтов, АКБ и времени полета от массы БПЛА представлен на рисунке 2.31.

Методика работы с графиком следующая: зная взлётную массу БПЛА (рама + полезная нагрузка + АКБ) определяется, при каком типе винта меньше энергозатраты на полет. Чем выше $Q_{эф}$, тем ниже кривая энергозатрат на графике. Для выбора типа АКБ, зная требуемое время полёта (рассчитанное заранее по предлагаемой методике), по графику определяется какой тип АКБ обеспечит более продолжительный полет. По графику возможно реализовать решения по логике: энергозатраты растут - возможно, надо применить винт с другими характеристиками); время полёта снижается - возможно, нужен АКБ с другими характеристиками или иного типа.

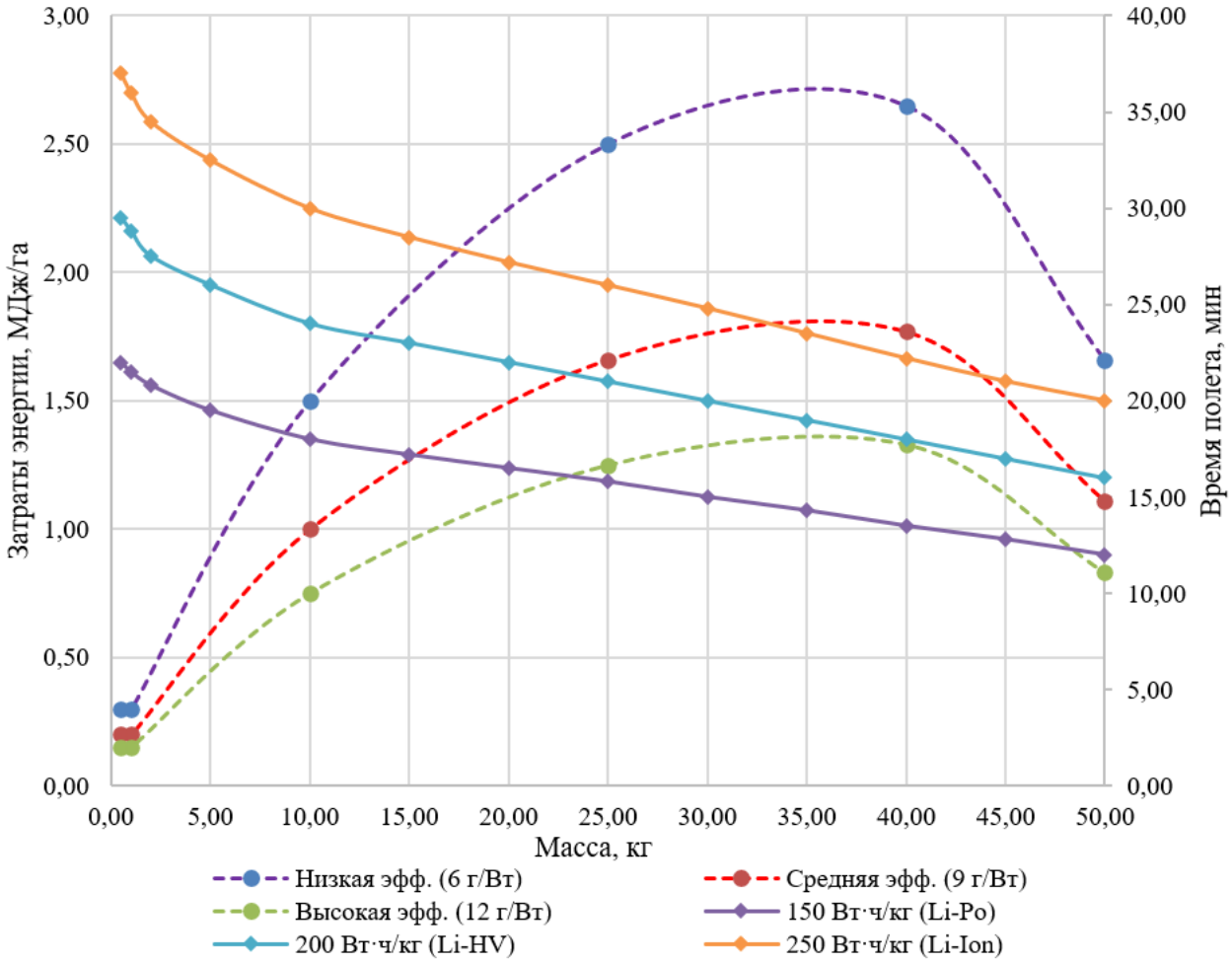


Рисунок 2.31 - График зависимости затрат энергии при различных типах винтов и времени при различных типах АКБ от массы БПЛА

Для расчета радиуса действия при установившемся горизонтальном полете необходимо применить итеративный метод вычислений [13–15, 200], поскольку доступная емкость батареи, ее напряжение и сила тока зависят от оставшегося заряда батареи. Метод состоит из следующих шагов: выбрать малый промежуток времени Δt, который будет единичной величиной времени при осуществлении расчетов; составить итеративную формулу для расчетов на основе выражения для расчета текущего напряжения батареи. На каждом шаге вычисляем:

$$U_{\text{ост}} = f(C_{\text{ост}}) \tag{2.184}$$

$$I_{\text{ост}} = \frac{P_{\text{пот}}}{U_{n+1}} \tag{2.185}$$

$$C_{\text{ост},n+1} = C_{\text{ост},n} - I_{n+1} \cdot \Delta t \tag{2.186}$$

Операции следует повторять до тех пор, пока $C_{\text{ост}} > C_{\text{мин}}$.

В результате получена система уравнений K показывающая зависимость значений параметров полетного задания от характеристик БАС.

$$K = \begin{cases} T = \sqrt{mg^2 + \dfrac{\rho_{\text{в}} \cdot C_x \cdot S_{\text{пов}} \cdot v^2}{2}} \\ v_i = \dfrac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{2n\pi r^2 \rho_{\text{в}} \cdot \sqrt{v^2 \cos\phi^2 + (v sin\phi + {v_i}^2)^2}} \\ P_p = k_h \dfrac{T^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{2\rho_{\text{в}} S}} \\ P_{\text{пот}} = \left(T \cdot v_i + F_{\text{сопр}} \cdot v\right) + P_r \\ P_r = \dfrac{1}{2}\rho_{\text{в}} v^2 S C_0 + \dfrac{2{P_h}^2 K_{1\text{a}}}{\rho_{\text{в}} v S} \\ E_{\text{п}} = \dfrac{T}{K_{2\text{a}} \rho_{\text{в}} \frac{(\frac{F}{K_{1\text{a}} \rho_{\text{в}}})^{\frac{3}{2}}}{D}} = \dfrac{D K_{1\text{a}}^{\frac{3}{2}}}{K_{2\text{a}}} \cdot \sqrt{\dfrac{\rho_{\text{в}}}{T}} \end{cases} \quad (2.187)$$

Также на общий показатель энергозатрат при эксплуатации БАС в полевых условиях существенно влияют энергозатраты бензогенератора для зарядки АКБ. В результате исследования разработана имитационная компьютерная модель автономного источника питания электрооборудования БАС для исследования его режима работы и получения нагрузочной характеристики бензогенератора [82].

Чаще всего полетное задание для БАС длится дольше чем 15–20 минут, поэтому предусматривают замену АКБ при посадке и дозаправке рабочего раствора. Разряженную АКБ заряжают непосредственно в полевых условиях зарядным устройством (ЗУ), предназначенного для эксплуатации конкретного БАС. Например, для зарядки АКБ БАС DJI Agras T30 производителем рекомендуется использование автономного генератора (АГ) DJI D9000i, который имеет двухканальный зарядный выход с поддержкой последовательного режима восстановления, т.е. способен производить непрерывный заряд АКБ для уменьшения или исключения простоев, для чего необходимо в наличии иметь запасные АКБ. Как было показано в статье [2,8] современные ЗУ (DJI CHX503–

3500) имеют на входе корректор коэффициента мощности из–за чего коэффициент мощности в процессе заряда АКБ достаточно высокий (близок к 1), а коэффициент не синусоидальности тока низкий (не превышает 3,74 %), но стоимость этого устройства довольно высока. Поэтому на практике в качестве АГ, как более дешевого варианта, используют серийные АГ с синхронным генератором соизмеримой мощности [131].

Проектирование системы «автономный источник – зарядное устройство – АКБ» представляет определенную сложность, связанное с построением системы дифференциальных уравнений, описывающих каждый узел. Программный комплекс SimInTech за счет библиотеки блоков позволяет создать имитационную компьютерную модель (ИКМ), которая визуально представляет собой принципиальную электрическую схему. Моделирование режимов работы автономного источника и ЗУ для БАС позволяют рассмотреть загрузку генератора и определить энергозатраты. На рисунке 2.32 представлена ИКМ АГ для БАС.

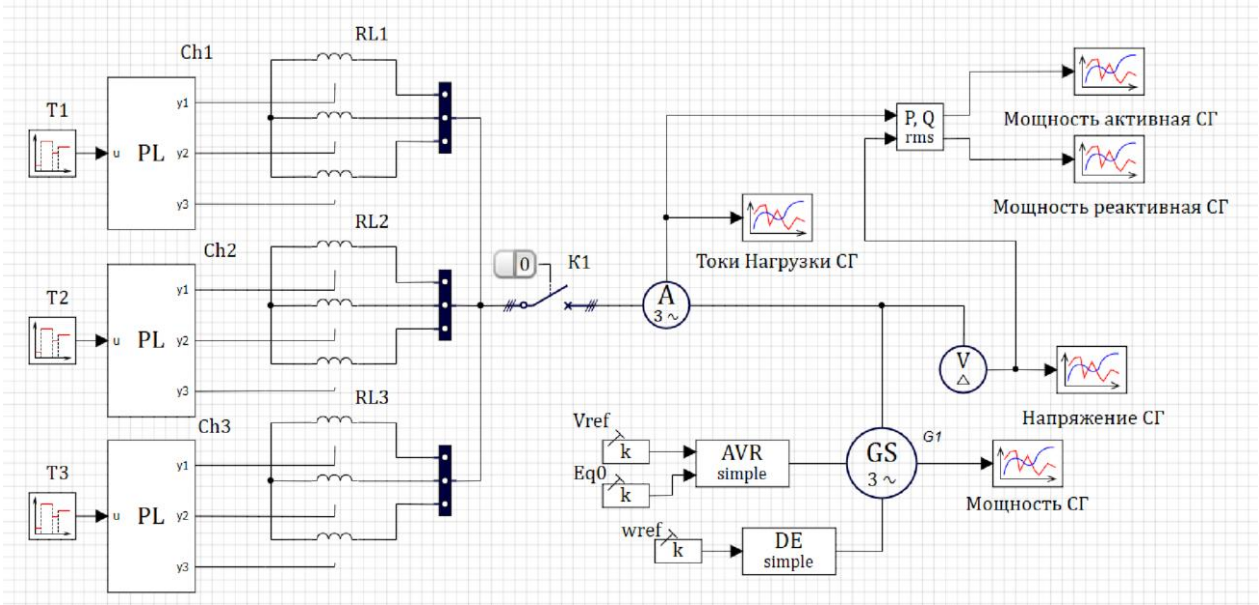


Рисунок 2.32 - Имитационная компьютерная модель автономного источника для БАС (модель выполнена в программе SimInTech)

В SimInTech блок синхронный генератор («ЭЦД – Генератор синхронный») описывается дифференциальными уравнениями Парка–Горева с преобразованием от abc координат к dq:

$$\begin{cases} \Psi_d = \omega_0 \int \left(u_d + \dfrac{R_s}{X_{s\sigma}} \cdot \left(\Psi_{ad} - \Psi_d \right) + \omega \Psi_q \right) dt; \;\; \Psi_d = \omega_0 \int \left(u_q + \dfrac{R_s}{X_{s\sigma}} \cdot \left(\Psi_{aq} - \Psi_q \right) - \omega \Psi_d \right) dt; \\ \Psi_{1d} = \omega_0 \int \left(\dfrac{R_{1d}}{X_{\sigma 1d}} \cdot \left(\Psi_{ad} - \Psi_{1d} \right) \right) dt; \;\; \Psi_{1q} = \omega_0 \int \left(\dfrac{R_{1q}}{X_{\sigma 1q}} \cdot \left(\Psi_{aq} - \Psi_{1q} \right) \right) dt; \\ \Psi_{ad} = X_{MD} \int \left(\dfrac{\Psi_d}{X_{\sigma s}} + \dfrac{\Psi_{1d}}{X_{\sigma 1d}} + \dfrac{\Psi_f}{X_{\sigma f}} \right) - \dfrac{\Delta E_1}{X_{ad}} X_{MD}; \;\; \Psi_{aq} = X_{MQ} \int \left(\dfrac{\Psi_q}{X_{\sigma s}} + \dfrac{\Psi_{1q}}{X_{\sigma 1q}} \right); \\ \dfrac{d\omega}{dt} = \dfrac{1}{T_J} \left(M_t - M_e \right) = \dfrac{1}{T_J} \left(M_t - \left(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d \right) \right); \;\; \Psi_f = \dfrac{\omega_0 R_f}{X_{ad}} \int \left(u_f + \dfrac{X_{ad}}{X_{\sigma f}} \cdot \left(\Psi_{ad} - \Psi_f \right) \right) dt. \end{cases} \quad (2.188)$$

где Ψd, Ψq, Ψad, Ψaq – проекции векторов потокосцепления в зазоре и потокосцепления реакции статора на оси dq; Rs – активное сопротивление обмотки статора генератора; $X\sigma s$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора генератора; ω – частота вращения ротора генератора; $\omega 0$ – частота вращения ротора генератора; uf – напряжение обмотки возбуждения; Ψf, $\Psi 1d$, $\Psi 1q$ – потокосцепления обмотки возбуждения и демпферных контуров; Rf, $R1d$, $R1q$ – активные сопротивления обмотки возбуждения и демпферных контуров; $X\sigma f$, $X\sigma 1d$, $X\sigma 1q$ – индуктивные сопротивления рассеяния обмотки возбуждения и демпферных контуров; Tj – постоянная инерции турбоагрегата; Mt – момент турбины; Me – электромагнитный момент.

В качестве приводного двигателя в ИКМ используется блок «Двигатель дизельный (type simple model)» DE основанная на ПИ–регуляторе скорости с уставкой по скорости ωREF. Регулирование напряжение реализовано блоком «система возбуждения (type simple model)» AVR представляющий собой корректор напряжения и моделируются апериодическим звеном 1–го порядка. Выходной сигнал корректора напряжения складывается с напряжением начального возбуждения Eq0, формируя входной сигнал для системы возбуждения EFE. Выходным сигналом модели является напряжение возбуждения EFD. Процесс заряда АКБ с помощью ЗУ возможно представить в виде регулируемой RL – нагрузки. В ИКМ рассматривается процесс последовательного заряда трех АКБ, которые представлены блоками «обобщенная цепь» RL1–3. Потребление электроэнергии в процессе заряда АКБ не постоянно, поэтому функцию изменения нагрузки, как изменение активно–индуктивного сопротивления можно реализовать с помощью блока программирования PL. Режим работы заряда АКБ реализуется

блоками «кусочно–постоянная» Т1–Т3. В ИКМ используются следующие допущения: в течение полета АКБ полностью разряжаются, коэффициент мощности равен одному ЗУ.

Рассмотрим работу ИКМ АГ для БАС на примере внесения комплексных гербицидов для пшеницы поля площадью 160 га. Используется два БАС типа DJI Agras T30, высота полета 3 метра, ширина захвата 9 м, время одного полета составляет 10 минут, производительность одного БАС 3,5 га/полет. Для каждого БАС применялись три АКБ, две находятся на зарядке, а один используется БАС. Так как коэффициент мощности ЗУ близок к 1, индуктивность в блоках RL1–3 отсутствует. В ИКМ рассматривается ЗУ типа DJI CHX503–3500, в блок PL заложена функция изменения блоков RL1–3 (рисунок 2.33).

$$\begin{cases} R(t) = 17,92 - 10,51 \cdot t, \ t < 0,17 \ ч; \\ R(t) = 16,1 \cdot e^{43,86(t-0,17)}, \ t > 0,17 \ ч; \end{cases} \quad (2.189)$$

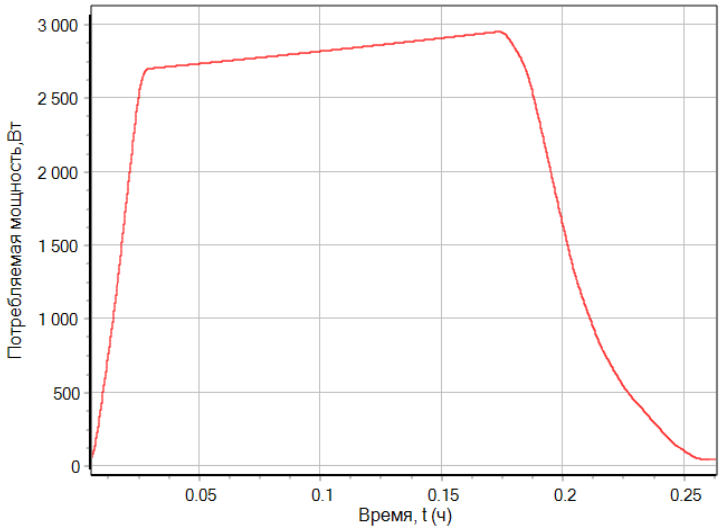


Рисунок 2.33 - График потребляемой мощности при зарядке одной АКБ БАС

Для настройки блоков «Двигатель дизельный (type simple model)» и «ЭЦД – Генератор синхронный» используем параметры генератора АГ A–ipower AD9500TEA той же мощности 9 кВА, что и многофункциональный инверторный генератор DJI D9000I. В ИКМ использованы стандартные настройки блока «Двигатель дизельный (type simple model)», а настройки блока «ЭЦД – Генератор синхронный» определены согласно паспортным данным синхронного генератора

(номинальная мощность 380 В, номинальная мощность 9 кВА, номинальный коэффициент мощности 0,8, номинальная скорость вращения 1500 об/мин, номинальная частота 50 Гц).

На практике время полета может быть существенно меньше 10 минут и зависит от нескольких факторов. Например, выбирается оптимальное стационарное место посадки, где происходит замена АКБ и заправка рабочим раствором – очевидно, что БАС необходимо проделать разное расстояния при полетах для опрыскивания всего поля. Кроме того, операторы стараются вернуть БАС для замены АКБ при их разряде до 20–30% от номинальной емкости для исключения аварийных ситуаций. Таким образом для непрерывной работы БАС необходимо использовать минимум три АКБ. Результатом моделирования является нагрузочная диаграмма АГ для БАС, которая приведена на рисунке 2.34.

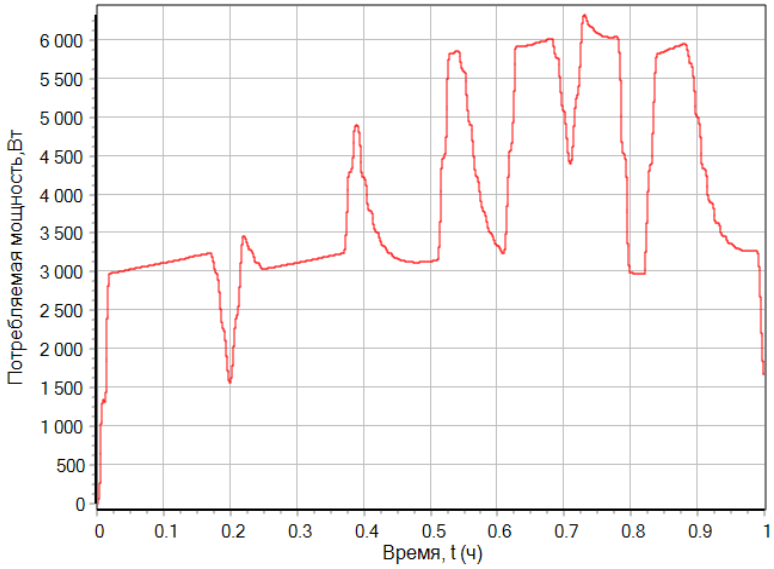


Рисунок 2.34 - График потребляемой мощности при поточном зарядке АКБ

График потребляемой мощности (рисунок 2.34) представляет собой нагрузочную диаграмму автономного источника, на основании которого максимальная активная мощность составляет 6326 Вт, средняя активная мощность – 3930 Вт, при этом за час персонал обеспечивает до шести раз замену АКБ, при этом возможен одновременный заряд двух АКБ.

Так же ИКМ позволяет получить данные для расчета количества топлива Q_T АГ за необходимый период времени по формуле:

$$Q_T = G_T \cdot P_н \cdot T_\text{р} \quad (2.190)$$

где G_T – удельный расход топлива (0,25 для дизельного генератора, 0,35 для бензогенератора), кг/кВт·ч; $P_н$ – потребляемая мощность, Вт; $T_\text{р}$ – время работы, ч.

Потребляемую электроэнергию в ИКМ возможно получить с помощью блоков «ЭЦ – Среднее значение за период» или «Интеграл от табличной функции» (на рисунке 2.32 не показаны).

Расчет по формуле (2.191) показал, что при потреблении электроэнергии 3,93 кВт·ч, количество топлива для АГ составит 0,98 л, соответственно для заряда АКБ БАС в течение одной смены необходимо 7,86 л. Поле площадью 160 га обрабатывается двумя БАС в течение одной смены поэтому расчетное потребление необходимого количества топлива составляет 15,72 л. Расчетное потребление бензина составит 22,4 л. На практике потребление топлива (бензин АИ–92) составило 25 л. Расхождение теоретически полученных данных с реальными в 8,9 % можно объяснить погрешностью в расчетах. Кроме того, возможно случайное включение электроприемников, т.е. погрешность в расчетах может быть связано с дополнительным потреблением неучтенных электроприемников (например, заряд СУ БАС или питания насосных установок).

Таким образом разработанная ИКМ автономного источника для БАС позволяет рассматривать режимы работы АГ с синхронным генератором с построением нагрузочной характеристики. На основании полученной характеристики возможно рассчитать необходимое количество топлива, оценить пиковое потребление электроэнергии и необходимую мощность генератора.

2.7 Результаты использования методов повышения эксплуатационной эффективности БАС при выполнении технологических операций

В разделе 2.1 представленной научной работы разработана комплексная система критериев оценки эффективности эксплуатации БАС в АПК, включающая экономический показатель $К_{экэ}$ и энергетический показатель $К_{энэ}$. Данные

безразмерные критерии позволяют количественно сопоставить традиционные технологии с внедряемыми БАС, а также сравнивать между собой беспилотные системы с различными техническими характеристиками, не ориентируясь на уровень ценовой политики. Предлагаемая методология позволяет увидеть направления повышения экономической и энергетической эффективности применения БАС, урожайности, качества продукции, что в совокупности повышает эксплуатационную эффективность всей системы.

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. Получена комплексная система математических моделей с ограничениями и допущениями в зависимости от применяемости БАС, которая позволяет определить оптимальный состав парка БАС, параметры режимы полета БПЛА, характеристики мониторинга, технологические режимы при выполнении агрономических операций.

На основе методологии предлагается следующая укрупненная последовательность определения параметров и критериев эксплуатационной эффективности БАС в цифровом земледелии.

Этап 1. Сбор и верификация начальных условий. На этапе фиксируются границы расчета: культура, площадь применения БАС, расчетный период, вид операции и база сравнения. Для хозяйства задаются площадь полей или участков, текущая технология выполнения операции, доступные ресурсы, инструменты, виды средств защиты растений и удобрений, сезонное окно работ по метеоусловиям, требования к качеству результата и ожидаемый эффект в виде снижения затрат, повышения урожайности, экономии ресурсов, снижении расхода рабочего раствора или данные мониторинга.

Этап 2. Расчёт метеопараметров. Для этого этапа собираются данные из ближайшей локальной метеостанции или рассчитываются по предложенной методике (система *M* и компьютерная модель COMSOL Multiphysics) на окно работ. Определяются параметры: солнечная радиация с учетом облачности,

температура и влажность воздуха и почвы, скорость ветра на разных высотах. Определяются ограничения по температуре и ветру.

В результате рассчитывается скорость ветра u_n на всех высотах полёта, стратификация и риск инверсии.

Этап 3. Расчёт параметров полетного задания для внесения СЗР и удобрений. Для внесения раствора применяется система *B* и компьютерная модель COMSOL Multiphysics. По свойствам жидкости, диаметру капли, скорости ветра, типа форсунок и дозе проверяются осаждение, снос, концентрация препарата в рабочем растворе, норма внесения рабочего раствора и ширина захвата.

Этап 4. Расчёт параметров полетного задания для операции мониторинга. Применяется система *C*. Для мониторинга учитываются данные: размер участка, GSD, тип и характеристика камеры, высота полета и перекрытия, определяется направление маршрута, число снимков, объем данных и время обследования.

Этап 5. Динамика и энергетика БАС. Применяется система *K* и имитационная модель автономного источника для БАС. На этапе фиксируются масса аппарата и полезной нагрузки, количество винтов, диаметр винта, лобовая площадь, коэффициент сопротивления, расчетная скорость, давление и температура воздуха, мощность дополнительного оборудования, паспортные параметры АКБ (напряжение, емкость, C-rate, число последовательных и параллельных блоков, глубина разряда и резерв на возврат).

Этап 6. Расчёт электротехнологического оборудования. Решаются системы *T1 и T2*. Если применяется подготовка раствора или электростатическая подзарядка, дополнительно уточняются данные о типах применяемых СЗР и удобрений, качестве исходной воды для приготовления рабочего раствора.

Этап 7. Проверка и итерация

Формируется таблица ограничений (таблица 2.22), если хотя бы одно ограничение не выполнено – меняются параметры: h_n, υ, $q_{\text{пр}}$, $Q_{\text{мин}}$, $d_{\text{к}}$, GSD, АКБ и повторяются расчёты с Этапа 2 (опрыскивание) или Этапа 3 (мониторинг).

Таблица 2.22 - Таблица ограничений

Параметр	Допустимый диапазон	Система
h_n (опрыскивание)	2–7 м	Система B
h_n (мониторинг)	15–400 м	Система C
E (коэфф. захвата)	0,7–0,8	Система B
We	≤ 2	Система B
N (плотность капель)	20–100 шт/см²	Система B
$q_{\text{пр}}$	>Д$_{\text{пр}}$, ≤ 15 л/га	Система B
$C_{\text{пр}}$	≤ 15%	Система B
$K_{\text{расп}}$	≥ 0,8	Система C
$W_{\text{уч}}$	≤ $W_{\text{б}}$	Система K
$C_{\text{ост}}$	≥ 20%	Система K
pH анолита	5–7 (под препарат)	Система T1

Этап 8. Применение параметров

В результате расчетов по представленной методологии оператор БАС получает схему проведения работ, информацию для выбора наиболее подходящей модели БПЛА с учетом характеристик пропеллеров, АКБ, генератора, исполнительного устройства и конкретные значения параметров для построения полетного задания. Для мониторинга такими являются: высота полета, GSD, курсовой угол, продольные и поперечные перекрытия, расстояние между соседними маршрутами, количество снимков, объем полученных данных, скорость взлета, перелета к объекту обследования, выполнения непосредственно мониторинга, перелета к месту приземления, приземления, количество АКБ, расход топлива генератора. Для внесения СЗР и удобрений: диаметр капли, высота обработки, скорость полета при обработке, курсовой угол, ширина захвата, норма внесения рабочего раствора, расход топлива генератора. Если применяются электротехнологии, то ток, напряжение и производительность электроактиватора, напряжение и заряд генератора технологии электростатического опрыскивания. Полученные значения параметров интегрируются в существующие применяемое ПО для построения полетного задания, а также могут быть использованы в качестве данных для анализа инженерным составом для оптимизации производственного процесса на предприятии или разработке нового соответствующего ПО.

В результате расчетов по данной последовательности можно получить набор основных характеристик технологий, а также установить структуру и степень

влияния отдельных параметров на критерии эффективности, например, для критерия экономической эффективности (рисунок 2.35).

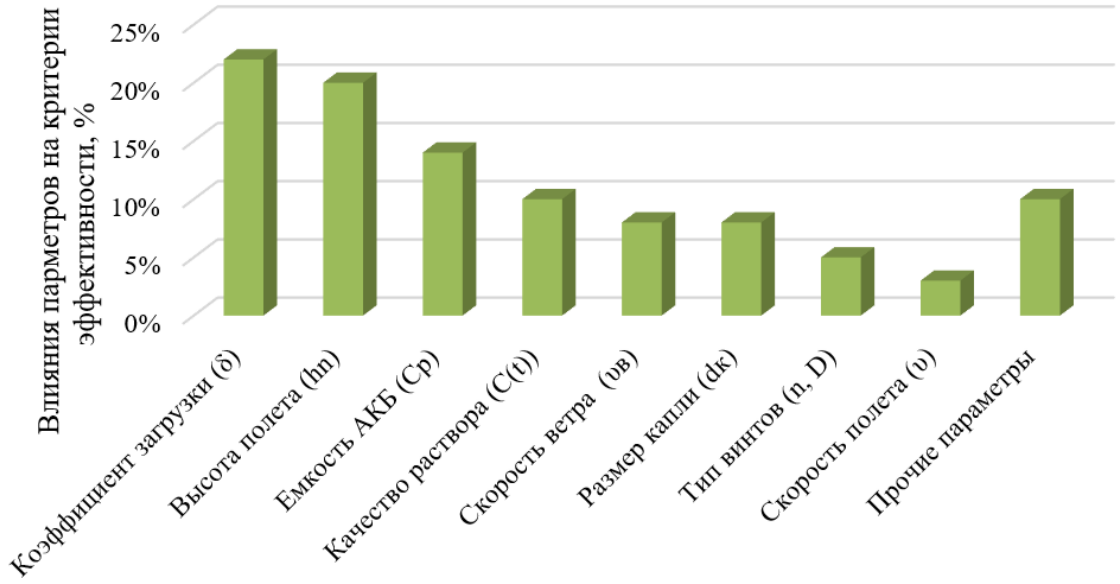
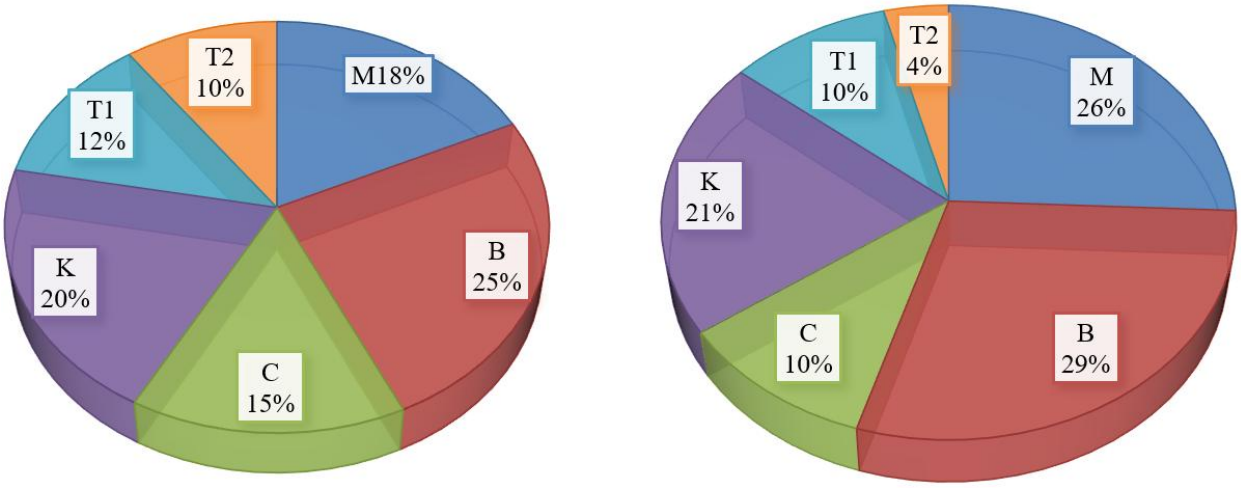


Рисунок 2.35 - Гистограммы влияния параметров в достижение прироста Кэкэ

По гистограмме можно сделать вывод, что, главный рычаг воздействия на эффективность - коэффициент загрузки. Увеличение этого показателя даст максимальный прирост экономической эффективности. Вторая по важности характеристика - высота полета. Ее оптимизация (например, снижение для уменьшения сноса или повышение для увеличения покрытия) должна анализироваться и всегда учитываться. На такие параметры как тип винтов, размер капли, скорость полета можно влиять в последнюю очередь. С точки зрения экономии - их вклад в прирост $К_{экэ}$ незначителен, но скажется на энергозатратах при проведении работ и внедрении всей технологии. Совокупность параметров с малой индивидуальной долей влияния, собранных в группу «Прочие параметры», говорит о том, что модель достаточно полная - учтены почти все значимые факторы. Каждая разработанная математическая модель методологии и ее параметры вносят свой вклад в рост критериев эффективности $К_{экэ}$ и $К_{энэ}$ и уровень этого влияния показана на рисунке 2.36.



а) б)

Рисунок 2.36 - Диаграммы вклада моделей в веса критериев: а) - в Кэкэ; б) - Кэнэ

Диаграммы наглядно показывают, что при внесении СЗР с БАС модели *B* (гидродинамика опрыскивания) и *K* (энергетика БАС) вносят наибольший вклад (до 45%) в рост критериев, а электрохимические и электростатические методы (*T1*, *T2*) дают значимый, вспомогательный эффект (до 22% и 14%).

Для практической реализации разработанных моделей и реального повышения значения критериев оценки эффективности эксплуатации БАС необходимо разработать комплекс алгоритмов, и на их основе адаптированные ПО построения ортофотопланов с последующей возможностью сегментации изображения для определения качества всходов путем подсчета количества растений и выделения областей с аномалиями развития сельскохозяйственной культуры. Возникает необходимость единого калькулятора по всей методологии, продиктованная практической невозможностью эффективного применения всех разработанных моделей по отдельности в реальном сельскохозяйственном производстве без специализированного инструмента. Разработанный единый инженерный калькулятор объединит все 7 методик, обеспечит автоматическую передачу данных между модулями и визуализирует статусы соблюдения ограничений, позволит за 10-15 минут получить готовое полётное задание, оптимизированное по экономическим, энергетическим и технологическим критериям. Такое ПО может использоваться не только инженерами, но и агрономами, операторами БАС, что

критически важно для масштабного внедрения цифрового земледелия в АПК. Так же появляется возможность выдвигать требования для характеристик рабочих органов и технического задания на их разработку.

Используя предложенную последовательность определения необходимых параметров входящих в отдельные модели, потенциально значимых способов и средств, были получены интервалы значений слагаемых критерия экономической и энергетической эффективности при традиционном использовании БАС и в результате применения инноваций (ПО и технических средств, таблица 2.23 и 2.24). Для энергетической составляющей возможно применить два подхода: оценка и сравнение энергетических затрат только БПЛА или всей БАС с соответствующей инфраструктурой, что позволяет сформировать более широкий подход для формирования управленческого решения при имеющемся многообразии БАС на рынке и интеграции идентичных систем.

Таблица 2.23 - Формирование экономического критерия

Технология		*NPV, тыс. руб*	$K_{рент}$	$K_{уст}$	$K_{вод\ ре}$	$K_{зам}$	$K_{пром}$	$K_{пров}$	$K_{экол}$	$\boldsymbol{K_{экэ}}$
Мониторинг										
Традиционное применение БАС		112 – 157	0,5-0,7	1,1-1,3	0,8-0,9	0,2-0,4	0,6-1,1	-	0,1-0,4	3,3-4,8
Инновационное применение БАС	Формирование полетного задания	442 – 546	1,7-2,1	0,75-0,91	1,0-1,4	0,5-0,8	1,0-1,4	-	0,97-1,00	5,9-7,6
	Использование ПО и технических средств	572 – 728	2,2-2,8	0,9-1,1	1,8-2,5	1,0-1,4	1,3-1,7	-	0,98-1,00	8,2-10,5
Внесение СЗР и удобрений										
Традиционное применение БАС		525 – 700	0,15-0,2	0,05-0,07	0,9-1,2	1,5-2,0	-	0,22-0,28	0,7-0,8	3,5-4,6
Инновационное применение БАС	Формирование полетного задания	2 130 – 3 195	0,6-0,9	0,17-0,25	1,5-1,9	2,6-3,2	-	0,35-0,42	0,9-0,95	6,1-7,6
	Использование ПО и технических средств	4 615 – 6 035	1,3-1,7	0,35-0,48	1,9-2,5	3,5-4,0	-	0,5-0,6	0,98-1,00	8,5-10,3

Таблица 2.24 - Формирование энергетического критерия

Технология		Еуд БПЛА МДж/га	Есов БАС, МДж/га	$К_{энэ}$	$К_{энэ\ БАС}$
Мониторинг					
Традиционное применение БАС		3,87–3,94	28,57–28,69	4,17-5,18	0,56–0,76
Инновационное применение БАС	Формирование полетного задания	1,30–1,32	26,00–26,07	4,6-5,65	0,80–0,84
	Использование ПО и технических средств	1,28–1,29	25,98–26,04	4,65-6,69	0,81–0,85
Внесение СЗР и удобрений					
Традиционное применение БАС		22,44–33,65	157,93–236,67	10,84-16,26-	0,35–0,56
Инновационное применение БАС	Формирование полетного задания	17,83–28,26	153,32–231,28	12,91-20,47	0,55–0,78
	Использование ПО и технических средств	16,42–24,73	151,91–227,75	14,75-22,22	0,57–0,80

Сводный результат показывает, что предложенные решения, включающие методологию, методы и средства могут приводить к ощутимым экономическим и энергетическим результатам (таблица 2.25).

Таблица 2.25 - Влияние предложенных ПО и средств на $К_{экэ}$ и $К_{энэ}$

Технология	$К_{экэ}$	$К_{энэ}$	$К_{экэ}$+$К_{энэ}$	Есов БАС, МДж/га	Примечание
Мониторинг					
Традиционная технолгия	1	1	1	120	-
БАС без методологии	3,3–4,8	4,17-5,18	7,74–8,98	28,57–28,69	Низкая эффективность из-за неоптимальных маршрутов и низкой загрузки
БАС с методологией	5,9–7,6	4,6-5,65	10,5–12,25	25,98–26,07	Значительный рост за счёт расширения сферы применения и корректного планирования полетного задания
БАС + ПО и средства	**8,2–10,5**	**4,65-6,69**	**13,25–16,19**	**24,02–26,04**	С внедрением ПО увеличивается объём данных и соответственно требуется больше электроэнергии для их обработки. Максимальная эффективность благодаря полному учёту всех факторов и инновациям
Внесение СЗР и удобрений					
Традиционная технолгия	1	1		360	-

Технология	$К_{экэ}$	$К_{энэ}$	$К_{экэ}$+$К_{энэ}$	Есов БАС, МДж/га	Примечание
БАС без методологии	3,5–4,6	10,84–16,26	14,34–20,86	157,93–236,67	Хорошая энергоэффективность относительно традиционной технологии, но низкая экономическая из-за высоких рисков и простоев
БАС с методологией	6,1–8,6	12,91–20,47	19,01–29,07	153,32–231,28	Рост за счёт снижения рисков, расширения сферы применения и оптимизации полетного задания
БАС + ПО и средства	**8,5–10,3**	**14,75–22,22**	**21,25–32,52**	**151,91–227,75**	Внедрение электротехнологий требует дополнительных энергозатрат, поэтому прирост незначительный, а в некоторых случаях и вовсе может отсутствовать

Переход от традиционной технологии к использованию БАС без применения методологии уже даёт положительный эффект, однако ощутимый 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. Таким образом, системное применение разработанных математических моделей, имитационных сред, инженерных номограмм, способов и средств позволяет перевести эксплуатацию БАС из эмпирической в научно обоснованную, прецизионную и экономически эффективную деятельность. Методология показывает пути совершенствования технологии и точки, где вклад научных организаций, занимающихся разработкой инновационных решений в сельском хозяйстве является наиболее значимым. Так, в результате расчетов, видно, что явным местом повышения эффективности является не разработка самих БАС, а оптимизация полетного задания при выполнении технологических операций и совершенствование методов и средств, задействованных в БАС: специализированное адаптированное ПО, рабочие органы, дополнительные электротехнологические приемы и прочие элементы. Рекомендуется внедрять разработанные решения в составе комплексной системы цифрового земледелия, что обеспечит максимальную экономическую и

энергетическую эффективность эксплуатации БАС в АПК и повысит эксплуатационные показатели.

2.8 Выводы по главе

1. Предложена комплексная система экономического и энергетического критериев оценки эффективности эксплуатации БАС, включающая возможность оценки в рублевом или энергетическом эквивалентах и безразмерными коэффициентами. Эти критерии позволяют связать между собой: параметры БАС, тип и качество технологической операции, экономические и энергетические показатели технологии, экологический эффект, инфраструктурные показатели. Безразмерный коэффициент экономической эффективности представляет собой сумму семи частных коэффициентов (рентабельности инвестиций, устойчивости погашения долга, экономии водного ресурса, замещения топлива, производительности мониторинга, производительности внесения и экологической эффективности), диапазон значений которого для типового хозяйства может составлять от 3 до 12. Безразмерный коэффициент энергетической эффективности характеризует относительное снижение удельных энергозатрат при замене отдельных технологий и позволяющий сравнивать различные типы БПЛА, возможный диапазон значений от 10 до 22.

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 учёт структуры предприятия, агротехнических требований, метеорологических факторов и обратных связей между подсистемами. Разработана структура типовых исходных требований на базовые машинно-технологические операции с использованием БАС, охватывающая 12 категорий: 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, учитывающие: тепло- и влагообмен деятельной поверхности, вертикальный профиль скорости ветра в диапазоне высот от 2 до 150 м, солнечную радиацию, термическую стратификацию, шероховатость подстилающих поверхностей и фаз развития сельскохозяйственных культур. Получена система уравнений, описывающая процессы испарения, осаждения и сноса капель рабочего раствора с учётом 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/см^2) и площади покрытия от высоты полёта (1-5 м) и нормы расхода рабочей жидкости (5-15 л/га).

4. На основе зависимостей растворимости пестицидов от водородного показателя, жёсткости, степени минерализации и температуры исходной воды для приготовления рабочего раствора проанализированы и обоснованы две электротехнологии повышения качества обработок при использовании БАС: электрохимическая активация воды – позволяет за счёт корректировки водородного показателя, жесткости и температуры повысить биологическую эффективность гербицидов на 18 %, фунгицидов – на 20–25 %, инсектицидов – на 15–30 %; электростатическая зарядка капель – обеспечивает увеличение плотности осаждения до 33 %, что открывает путь к снижению нормы расхода препаратов и экологической нагрузки.

5. Созданная 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), что даёт возможность научно обоснованно корректировать параметры полёта БПЛА. В COMSOL Multiphysics разработана компьютерная модель распространения воздушных потоков, создаваемых вращающимися лопастями БПЛА, которая показала, что на общей области покрытия растений рабочими растворам порядка 20 м значения скоростей воздуха изменяются от 5 м/с до 20 м/с, а это может привести к неравномерной дозе внесения СЗР.

6. Разработаны математические модели мониторинга сельскохозяйственных объектов для составления полетного задания, учитывающие взаимосвязь: летных характеристик с требуемой вероятностью распознавания объектов ($K_{\text{расп}}$ →100%), пространственным разрешением (0,5-7 см/px), параметрами съёмки (высота 1-300 м, перекрытия 60-90 %) объёмом 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 полётное задание по критериям минимизации времени обследования, количества снимков и энергии, требуемой для полета. Получена номограмма определения параметров аэрофотосъемки при значениях пикселя 1,5 до 4,5 мкм и размера объекта от 1 до 20 см и графики зависимости затрат энергии и времени полета от массы БПЛА (0,25-50 кг) при различных типах винтов (6-12 г/Вт) и АКБ (150-250 Вт·ч/кг).

7. 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) или электроэнергии на выполнение операции (0,04-0,14 МДж/га при мониторинге и 3-12 МДж/га при внесении СЗР), и определить установленную мощность генератора (1-3 кВт для мониторинга и 5-10 кВт для внесения СЗР).

8. Разработана укрупненная последовательность определения эксплуатационной эффективности БАС и установлены их следующие интервалы

значений: для мониторинга коэффициент экономической эффективности $К_{экэ}$ 3- 5, энергетической 3-6. При применении специализированных средств и программного обеспечения диапазон изменится: для экономической составляющей – 8-10 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.

9. Выявлено, что доминирующее влияние на рост коэффициентов экономической и энергетической эффективности оказывает коэффициент загрузки БАС; гидродинамика опрыскивания и энергетика БАС вносят наибольший вклад (до 25 % каждая) в рост коэффициентов, электрохимические и электростатические методы дают также существенный эффект (до 22 % и 14 % соответственно). Доказано, что максимальная эффективность достигается не только за счёт улучшения конструктивных характеристик самой БАС, но и за счёт системного применения разработанных моделей, специализированного ПО и дополнительных технических средств.

3. РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ И СРЕДСТВ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ БАС В ЦИФРОВОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

3.1 Алгоритм и описание программного обеспечения для обработки изображений и построения ортофотоплана

При анализе рынка БАС в Российской Федерации, представленного в главе 1 выявлено, что актуальной задачей является разработка собственного ПО для обработки изображений и построения ортофотоплана из снимков, полученных с БПЛА. Имеются отечественные разработки подобных программ для других сфер применения, например геодезии, но они весьма сложны в освоении специалистами агрономических служб и имеют избыточный функционал, следовательно, требуется их унификация и существенное упрощение [30, 184, 219].

Алгоритм программного обеспечения для обработки изображений и построения ортофотоплана можно представить блок–схемой, изображённой на рисунке 3.1:

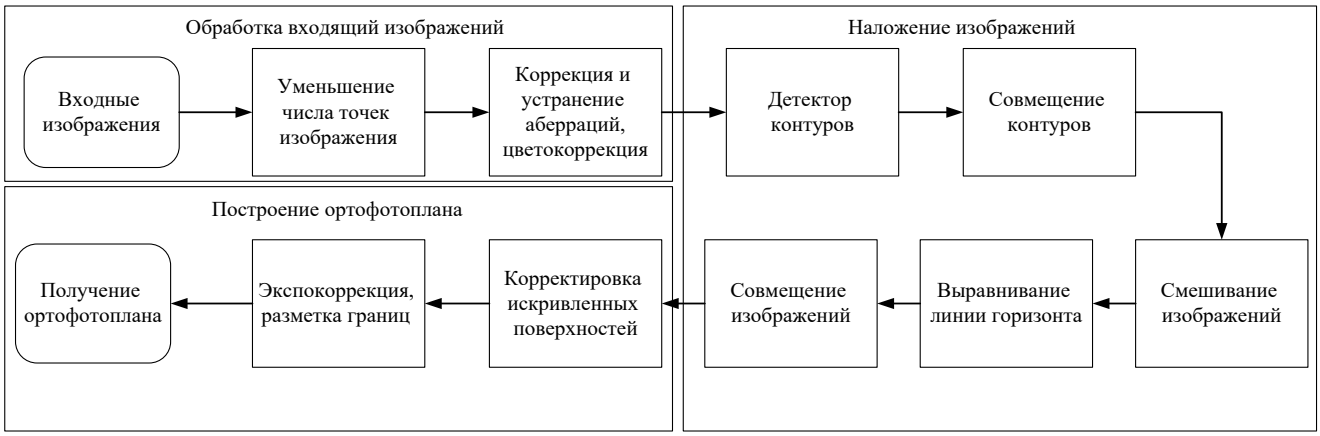


Рисунок 3.1 - Блок-схема алгоритма для обработки изображений и построения ортофотоплана

На входе размеры изображений уменьшаются до подходящих, с целью уменьшения времени сшивки. С аберрациями (искажениями лучей света) борются методами их компенсации, коррекции и устранения. Основные способы зависят от типа оптических приборов. В блоке цветокоррекции получаемые изображения

могут иметь различные показатели баланса белого и экспозиции, что требует соответствующей коррекции.

Далее изображения подвергаются гамма–коррекции, затем вычисляются суммы значений каждой точки серии изображений по каждому из каналов *RGB*. На следующем этапе вычисляется общий коэффициент коррекции, который должен быть как можно ближе к 1. На завершении этапа «Обработка входящий изображений» к коэффициенту коррекции применяется обратная гамма–коррекции операция.

Для того, чтобы корректно были сшиты изображения необходима решить задачу нахождения контуров, которая в свою очередь тесно связана с задачей определения углов объектов на изображении. Для определения углов применяется детектор Харриса, который рассматривает производные яркости изображения по множеству направлений. Для рассматриваемого объекта определяется сумма квадратов разностей между сдвинутым и исходным окном.

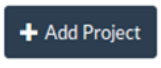
После того как определены особые точки, их необходимо совместить с аналогичными на ближайших изображениях в серии. На данном этапе определяются все подходящие изображения. На этапе совмещения изображений выполняются проективные преобразования для корректного совмещения и наложения изображений. Коррекция линии горизонта, дает только лишь относительный поворот между ближайшими изображениями и возникает ситуация, когда на финальном изображении линия горизонта значительно деформирована в процессе съемки, вследствие разного положения камеры и ее наклона, следовательно необходимо преобразовать изображения, чтобы при наложении минимизировать данные эффекты, особенно это важно при получении карт поверхности.

На этапе построения ортофотоплана происходит преобразование изображений в ортогональную проекцию. Это ключевое действие, так как только в ортогональной проекции все объекты имеют единый масштаб, что позволяет производить точные измерения расстояний и площадей. Используя данные о контурах и привязке, алгоритм пересчитывает координаты каждого пикселя

исходного снимка таким образом, чтобы устранить перспективные искажения. Создается ЦМР или ЦММ. Для коррекции смещений, вызванных рельефом (параллакс), задействуются данные о высотах. Каждый пиксель «поднимается» на свою высоту, чтобы построить проекцию на плоскость в правильной точке (ортопоправка). Происходит сборка обработанных фрагментов в одно общее полотно на основе их географических координат, создается ортофотоплан.

В результате исследования, на основе приложения OpenDroneMap (ODM) с открытым исходным кодом, разработано ПО для создания ортофотопланов. Проведена апробация, показывающая его работоспособность. Интерфейс весьма удобен и прост в использовании, кроме того, программный продукт содержит ряд инструментов для обработки геометрии карты: инструмент определения угла неровности рельефа; инструмент определения координат точки; инструмент измерения расстояния на карте; инструмент измерения площади; инструмент измерения перепада уровня (неровности) рельефа; инструменты позиционирования карты. В начале работы, после предварительной настройки, необходимо указать серию изображений, из которых строится ортофотоплан. При обработке изображений находятся совпадающие точки, которые впоследствии соединяются. Из этого следует требование к перекрытиям при построении полетного задания – минимум 65% [187].

Стартовое окно программы состоит из рабочего окна – основное пространство экрана для отображения текущих проектов и панели управления.

Для добавления нового проекта необходимо нажать клавишу 

расположенную в верхнем правом углу рабочего пространства программы. В открывшемся окне New Project в графе Name вводится имя проекта в графе Description – описание создаваемого проекта (рисунок 3.2).

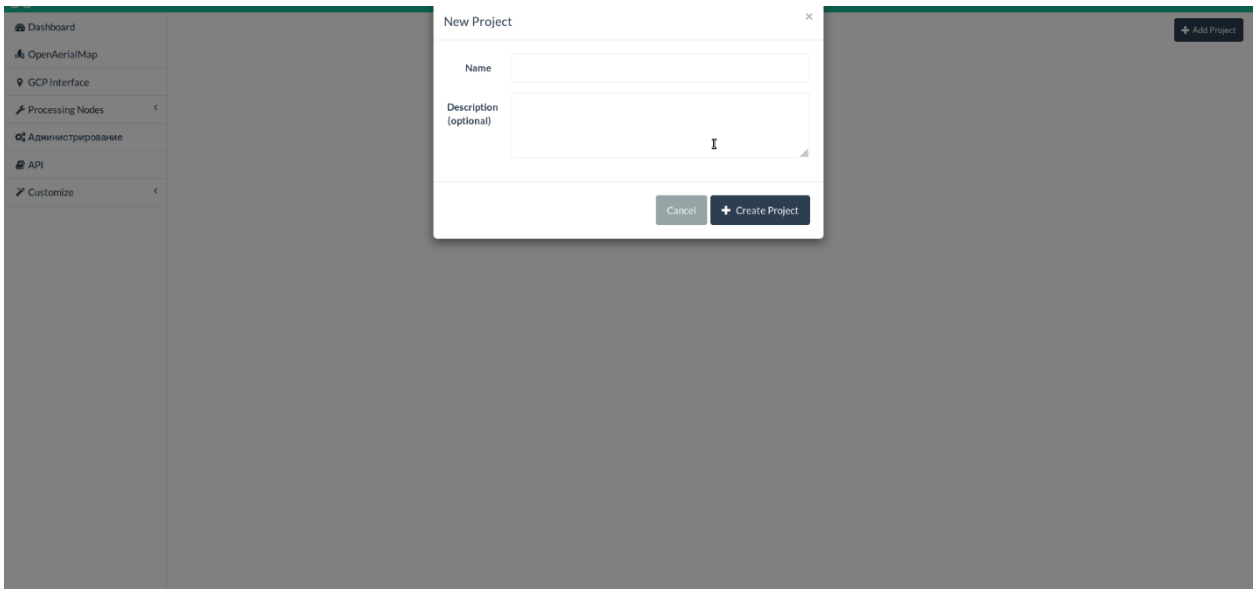


Рисунок 3.2 - Скриншот окна создания проекта

Созданный проект отображается в рабочем пространстве программы. При нажатии кнопки Edit можно внести корректировки в проект (рисунок 3.3).

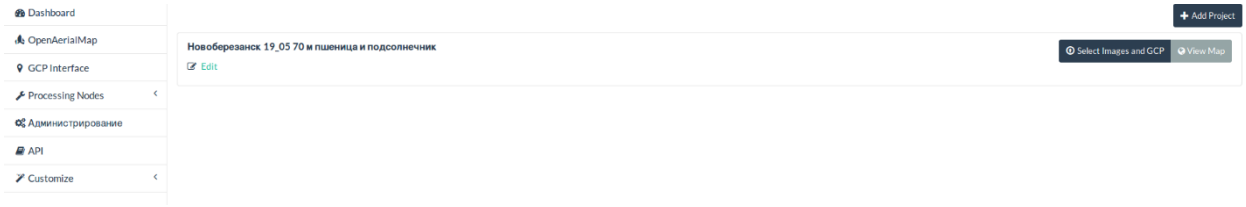


Рисунок 3.3 - Скриншот окна отображения созданных проектов

Так же при необходимости можно нажать клавишу Delete меню Edit для удаления проекта.

Для выбора фото необходимо нажать клавишу Select Images and GCP. Указав путь хранения фото выбираются нужные для ортофотоплана. В один проект можно добавить до 1000 фото.

После завершения добавления фото следует нажать клавишу Start Processing для начала процесса обработки фото или Cancel для отмены операции (рисунок 3.4).

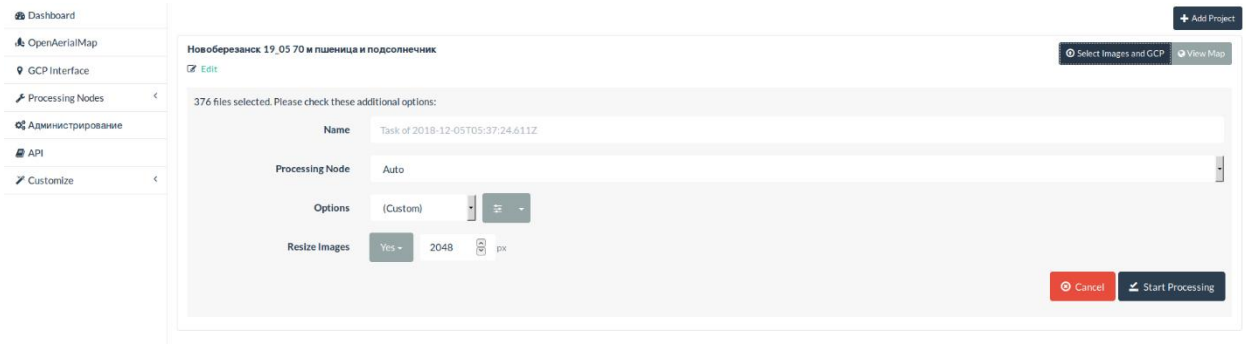


Рисунок 3.4 - Скриншот окна начала обработки или отмены операции

Программа начинает процесс обработки фото, в процессе загрузки на экране отображается информация о стадии загрузки, количестве фото и объеме занимаемой ими памяти (рисунок 3.5).

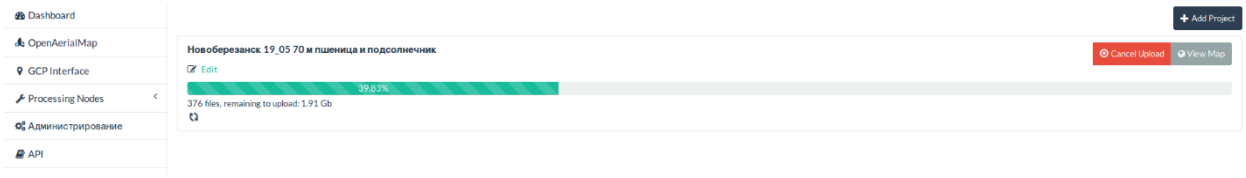


Рисунок 3.5 - Скриншот окна загрузки материала

Процесс может длиться от нескольких минут до нескольких часов, в зависимости от производительности ПК и объема фото. Информация о состоянии обработки проекта отображается на экране. Знак Running говорит о том, что продолжается процесс создания карты, так же в окне отображается время работы проекта. Одновременно можно запускать несколько проектов. Скорость обработки и количество одновременно обрабатываемых проектов так же зависит от характеристик компьютера и объема фото. Информационная надпись Queued говорит о том, что проект находится в очереди на обработку (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 - Скриншот окна текущих проектов

По завершению процесса обработки вместо надписей Queued или Running появится надпись Finish, что свидетельствует о завершении процесса и возможности перейти к просмотру и анализу полученного изображения. Для просмотра двумерной карты следует нажать клавишу 

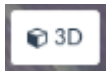
, находящуюся справа от названия проекта. Созданная карта автоматически по GPS меткам фото накладывается на off–line карту (рисунок 3.7).

Для изменения интенсивности отображения карты можно воспользоваться ползунком 

располагаемым в нижней части карты.

Для проведения элементарных операций измерения расстояния или площади можно воспользоваться инструментом 
. При нажатии на кнопку 

можно «поделиться» ссылкой на проект.

При нажатии на кнопку 

программа переходит к объемной обработке карты и открывает ряд дополнительных инструментов для анализа изображения (рисунок 3.8).



Рисунок 3.7 - Изображение ортофотоплана местности (на фото часть рисовой системы)

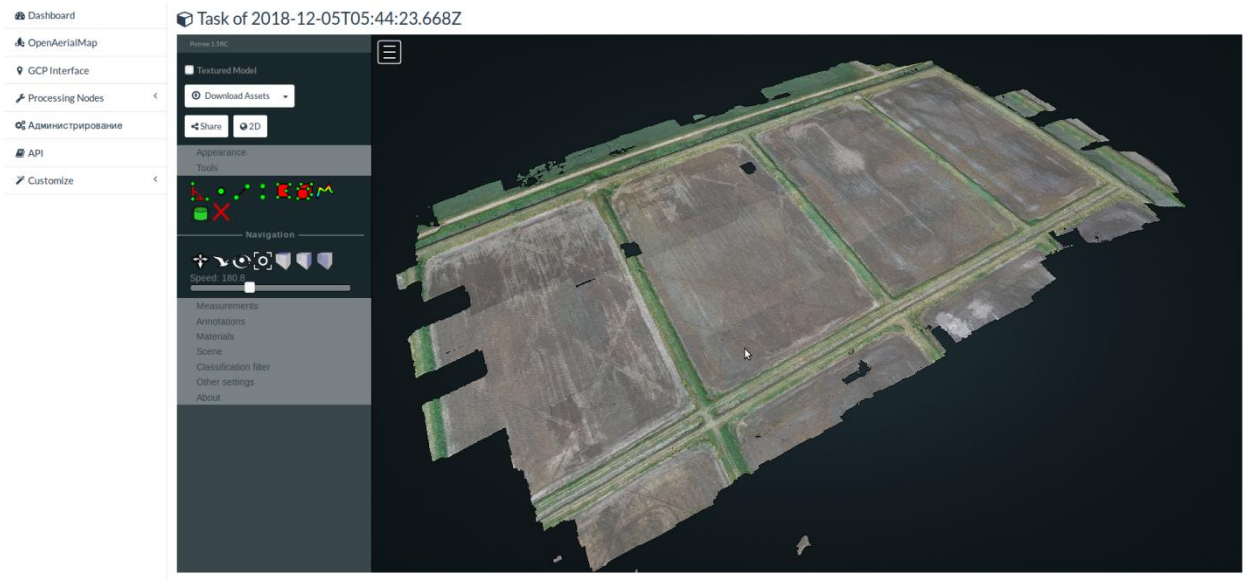


Рисунок 3.8 - Трехмерное изображение участка

В верхнем правом углу располагается окно Download Assets для скачивания проекта. В зависимости от дальнейших работ с картой пользователь может выбрать форматы для сохранения .GeoTIFF, .PNG, .MBTTiles, .LAZ, .PLY и др. После этого указывается путь сохранения файла.

Для обработки геометрии карты в программе имеется ряд специализированных инструментов: инструмент определения неровности рельефа, инструмент определения координат точки, инструмент измерения расстояния на карте, инструмент измерения площади, инструмент измерения перепада уровня (неровности) рельефа, инструменты позиционирования карты (работают совместно с нажатием кнопок мыши).

При использовании инструмента неровности рельефа под картой открывается дополнительно окно, показывающее разрез рельефа. Так же в открывшемся окне справа показываются координаты выбранных точек (рисунок 3.9).

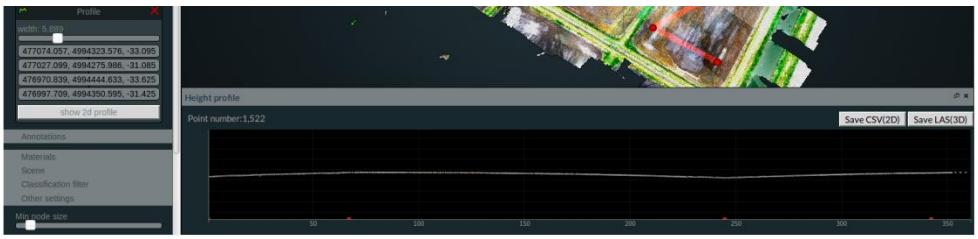


Рисунок 3.9 - Изображение примера измерения неровности рельефа

Для работы с цветовыми фильтрами в программе представлена вкладка атрибутов (Attributes). На данной вкладке реализована возможность цветовой фильтрации изображения и коррекции гаммы, яркости и контраста. Данная функция может являтся аналогом создания карты NDVI и служить инструментом предварительного определения неравномерности содержания минеральных питательных веществ в растении (инструмент предварительной диагностики состояния посевов). Для работы с градацией цветов в программе применен инструмент Min node size (рисунок 3.10).

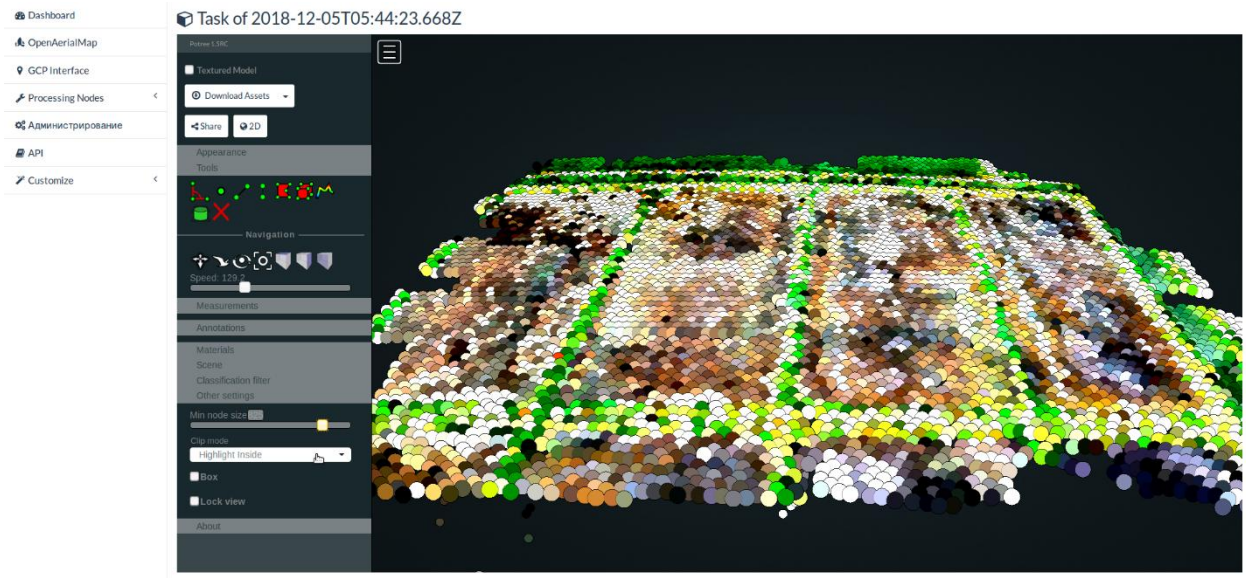


Рисунок 3.10 - Изображение примера работы с инструментом Min node size.

Реализация и внедрение предлагаемого ПО может привести к снижению числа аналитиков, функции аналитика частично берет на себя оператор. Это снижает затраты на персонал за счёт уменьшения потребности в высококвалифицированных аналитиках или перераспределения их времени. При заработной плате аналитика $C_{\text{д}}$ = 60 000 руб./мес., перераспределение 30% его рабочего времени приводит к экономии ~ 240 000 руб./год. Кроме того, государство активно субсидирует внедрение БАС в АПК, что напрямую снижает капитальные инвестиции I_0, покрывая 90–100% стоимости обучения по программам БАС. Снижаются затраты на обучение $I_{\text{обуч}}$, агроному не нужно учиться 144 часа (63 300 руб.), достаточно 2-дневного курса (15 000 руб.), экономия - 75% на обучении. Снижаются так же капитальные инвестиции в части стоимости ПО до 50%.

Стоимость профессионального ПО для фотограмметрии составляет Pix4Dmapper - 29 000 руб./мес., Agisoft Metashape - 327 000 руб.(единоразово). Внедрение предложенного ПО увеличивает коэффициенты: рентабельности инвестиций $K_{\text{рент}}$ на 0,6 о.е., устойчивости при погашении долга при внедрении БАС $K_{\text{уст}}$ на 0,15 о.е., и коэффициент производительности работ по мониторингу $K_{\text{пром}}$ на 0,2 о.е. Общий прирост критерия экономической эффективности может составить 0,95 о.е. (13,8%). Сокращение времени обработки данных в 2 раза снижает энергетические затраты персонала $E_{\text{перс}}$ и энергозатраты на серверную обработку данных $E_{\text{сервер}}$ на 30%, обеспечивая тем самым прирост критерия энергетической эффективности $К_{энэ}$ на 0,05 о.е. (5,8%). Внедрение описанного ПО позволяет существенно влиять на расчет экономической и энергетической эффективности, одновременно повышая лояльность агрономических служб к технологиям точного земледелия.

3.2 Алгоритм работы и программное обеспечение по сегментации областей изображений и распознавания для оценки качества всходов

Текстурный анализ и сегментация изображений – ключевой инструмент в цифровом земледелии, позволяющий выделять целевые объекты благодаря универсальности этого признака. Несмотря на отсутствие единого формального определения текстуры для конкретных задач, успешно применяются специализированные алгоритмы. На сегодняшний день одними из наиболее эффективных методов сегментации изображений являются методы, основанные на кластеризации и с использованием гистограмм и графов [76, 124, 219].

Методы, основанные на теории графов, описываются графами $G = (V_{i,j},, E_{\text{расп}})$, где каждый узел графа v_i входит в множество V и соответствует точке изображения. В свою очередь $E_{\text{расп}}$ – соединяющие рядом лежащие точки. Вес граней $\omega(U_i, U_j)$, входящих в $E_{\text{расп}}$определяется свойствами изображения и является мерой отличия близлежащих элементов U_i и U_j друг от друга. Эта мера

зависит от таких свойств изображения, как насыщенность, цвет, расположение и других свойств. При использовании метода графов, сегментирование $S_{\text{расп}}$ является подмножеством $V_{i,j}$, иными словами, любой сегмент изображения является подмножеством граней $E_{\text{расп}}$.

Входные данные – граф $G = (V, E)$, представленный n вершинами и m гранями. Выходные данные – сегментированное изображение V состоящее из компонентов $S = (C_1 \dots, C_r)$. Блок схема алгоритма представлена на рисунке 3.11.

На первом этапе загружаются изображения, далее на втором и третьем этапах определяются особенности и вычисляются «сходства». На четвертом сортируются грани по увеличению удельного веса $\Pi = (O_1, \dots., O_m)$. На пятом этапе сегментируется первая область S^0, где каждая вершина v_i является частью S^0. При необходимости повторяется предыдущий шаг для $q = (1 \dots, m)$. Далее принимаются v_i и v_j как обозначение вершин соединяющих q–ю грань, т. е. $O_q = (v_i, v_j)$. Если v_i и v_j части компонентов S^{q-1} и $w(O_q)$ мало по сравнению с разницей между этими компонентами, то необходимо их объединить. В противном случае шаг не совершается. На пятом этапе происходит сегментация изображений. Пусть C_i^{q-1} компонент S^{q-1} состоящий из v_i и C_j^{q-1} компонент, состоящий из v_j. Если $C_i^{q-1} \neq C_j^{q-1}$ и $w(O_q) MInt(C_i^{q-1}, C_j^{q-1})$ тогда S^q получен из S^{q-1} путем объединения C_j^{q-1} и C_j^{q-1}, в противном случае $S^q = S^{q-1}$. На шестом этапе алгоритма выгружаются изображения с выделенными сегментированными участками.

Полученная фотограмметрическая информация становится максимально полезной только после соответствующей программной обработки. Исследования снимков могут дать информацию об аномалиях почв, особенностей развития растений, их болезней, выделить и посчитать отдельные растения. Дополнительный пласт ценной информации можно получить при соответствующей обработке последовательности снимков во время обследовании одного и того же исследуемого объекта, что может помочь выявить закономерности развития или возникшие аномалии [86].

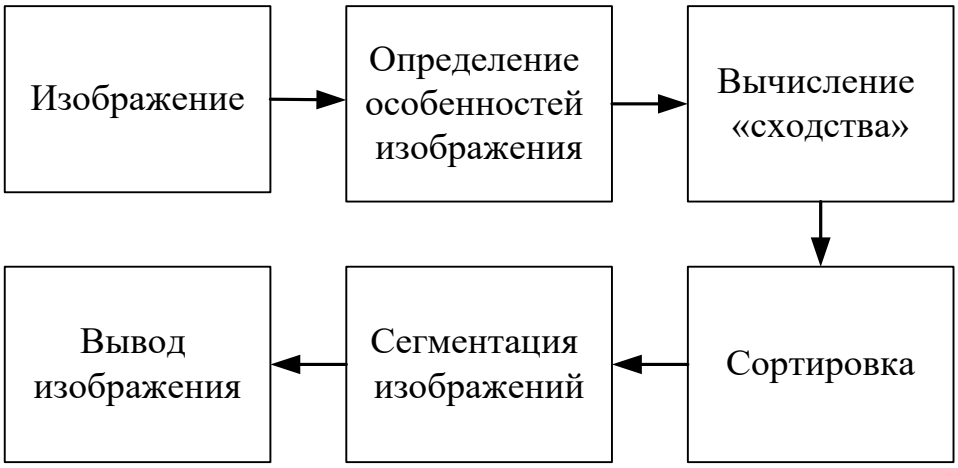
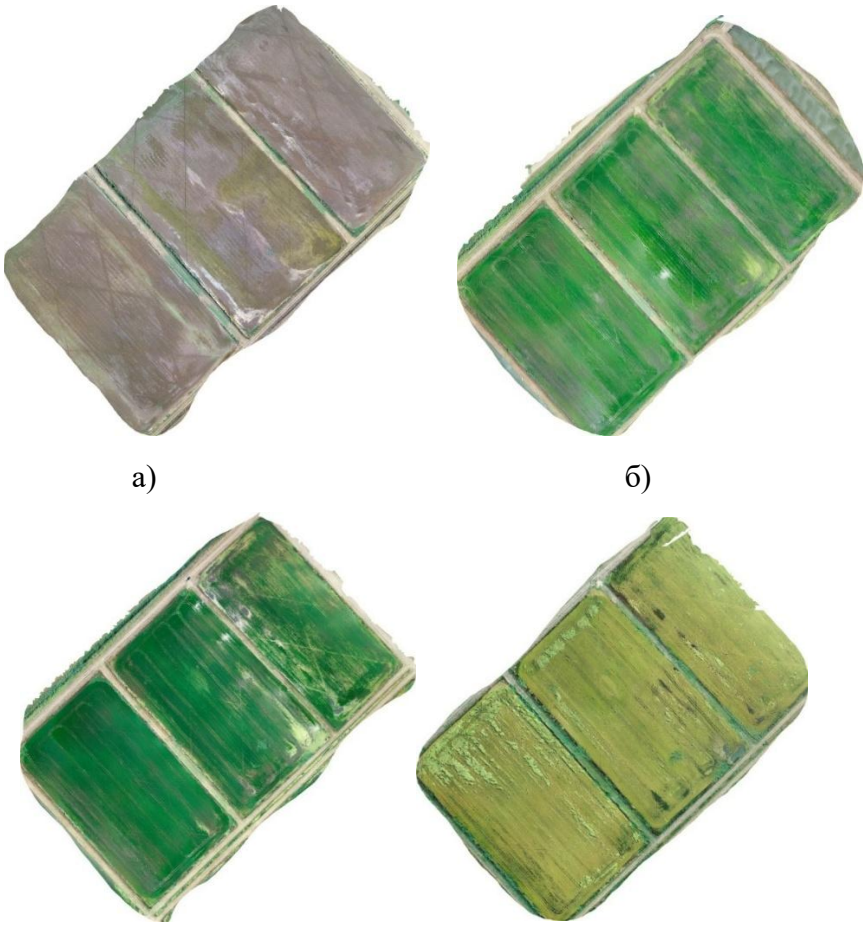


Рисунок 3.11 - Блок схема алгоритма программы по сегментации областей изображений

В качестве примера рассматривается серия снимков участка рисовых чеков. Данная серия была получена в период с конца мая по середину сентября. Так, исходя из данных (рисунок 3.12) выделяются дефекты – очаговые аномалии.



а) б)

в) г)

Рисунок 3.12 - Снимок характерного участка рисового чека: а) – по состоянию на май; б) – по состоянию на июнь; в) – по состоянию на август; г) – по состоянию на сентябрь

Проблема выявления очаговых аномалий связана с проблемами сегментации изображений в техническом зрении. Для эффективного процесса сегментации изображений алгоритм сегментации должен обладать следующими свойствами: выделять только те области, которые понятны и интерпретируемы человеком; обладать быстродействием. В частности, выполнение этих требований позволит использовать алгоритм для сегментации изображений в потоковом видео (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 - Сегментированные очаги сорной растительности (просянка)

Существует несколько способов оценки качества сегментирования, но в целом они сводятся к разделению похожих и отличных компонентов и их объединения. Из этого следует, что вес граней между двумя узлами подобных компонентов невысок, соответственно между различными компонентами – высок. Для оценки сходства рядом лежащих областей служат логические утверждения – предикаты ($D_{\text{пр}}$). Предикатом оценивается различие между элементами двух областей относительно различия рядом лежащих элементов внутри каждой из областей в отдельности.

Компоненты $C_1, C_2 \dots C_r$ входящие в множество V будут различными тогда, когда выполняется условие:

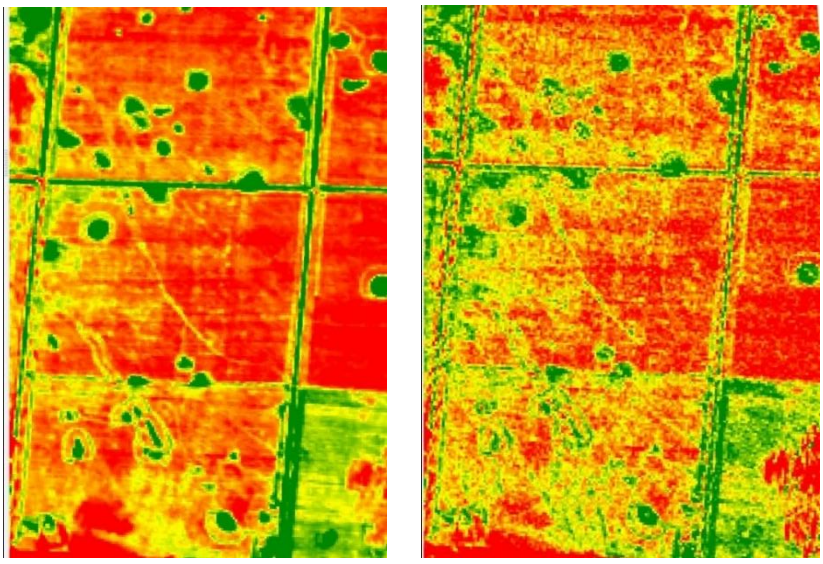
$$Dif(C_1, C_2) = \min_{\substack{U_i \in C_1 \\ U_j \in C_2}} [\omega(U_i, U_j)] E^{\omega(U_i, U_j)} \quad (3.1)$$

В случае если граней между C_1 и C_2 нет, то применяется уравнение:

$$Dif(C_1, C_2) = \infty \quad (3.2)$$

Важную роль в данном методе играет пороговая функция, которая определяет минимальное значение, при котором предикат принимает то или иное условие. Сегментация изображений возможна с помощью программного кода (Приложение В).

Анализ серии снимков в различные периоды показывает, что наличие очагов поражений сорными видами растительности приводит к замещению ими культивируемой культуры в границах очага, что в свою очередь приводит к прямому экономическому ущербу вследствие снижения урожайности (рисунок 3.14). Этого можно избежать, например, за счет формирования полетного задания, после анализа поля на предмет засоренности и отправки БАС для локальной обработки.



а) б)

Рисунок 3.14 - Результат обнаружения очагов распространения просянки в рисовой системе на основе ортофотоплана с БАС в различные периоды: а) – весенний период; б) – летний период

Экономическую эффективность такого подхода следует оценивать на этапе анализа фотограмметрической информации, т. к. возможно ожидаемый экономический ущерб, вследствие локального снижения эффективности, будет меньше, чем совокупность мероприятий по обработке очагов. Эти вопросы требуют дополнительной проработки и соответствующего материально–технического обеспечения.

Помимо идентификации проблемного очага, вызванного действием сорной растительности, болезней или вредителей, возможно распознавание каждого растения (технические и некоторые зерновые) на ранних фазах развития для оценки качества всходов. Код программы для распознавания реализован на языке Python, который использует компьютерное зрение для обнаружения и подсчета растений на ортофотоплане (Приложение Б). Алгоритм действия следующий: загружается ортофотоплан, изображение преобразуется в цветовое пространство для лучшего выделения зеленых растений, создается маска, выделяются зеленые области (растения), применяются морфологические операции для улучшения маски, находятся контуры растений на маске, фильтруются контуры по минимальной площади для исключения шума, подсчитывается количество обнаруженных растений, визуализируется процесс обнаружения [80].

Формула эффективности распознавания растений на поле по ортофотоплану может быть представлена в виде точности классификации растений на фото $K_{\text{тк}}$ или $F1$–меры, учитывающей баланс между полнотой ($R_{\text{полн}}$) и точностью ($R_{\text{точн}}$). Точность классификации растений может быть найдена по формуле:

$$K_{\text{тк}} = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \tag{3.3}$$

где $K_{\text{тк}}$ - точность классификации растений на фото, о.е.; TP – число правильно распознанных растений, ед; TN – число правильно распознанных фоновых объектов, ед; FP – число ошибок при распознавании, ложные срабатывания, ед; FN –число пропущенных растений, ед.

$F1$–мера для учета дисбаланса классов определяется выражением:

$$F1 = 2 \cdot \frac{R_{\text{точн}} \cdot R_{\text{полн}}}{R_{\text{точн}} + R_{\text{полн}}} \quad (3.4)$$

В свою очередь полнота ($R_{\text{полн}}$) и точность ($R_{\text{точн}}$) определяются по выражениям:

$$R_{\text{точн}} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3.5)$$

$$R_{\text{полн}} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3.6)$$

Интегральная оценка эффективности включает взвешенную точность по фазам роста $W_{\text{фр}}$ может быть рассчитана по формуле:

$$W_{\text{фр}} = \sum_{i=1}^{N} W_i \cdot K_{\text{тк}\,i} \quad (3.7)$$

где W_i – вес фазы роста, о.е.

С учетом коррекции качества данных ортофотоплана получаем формулу эффективности распознавания $K_{\text{расп}}$:

$$K_{\text{расп}} = F1 \cdot Q_{\text{орто}} \cdot Q_{\text{фаза}} \cdot Q_{\text{высота}} \quad (3.8)$$

где $Q_{\text{орто}}$ – поправочный коэффициент качества ортофотоплана о.е.; $Q_{\text{фаза}}$ – коэффициент сложности фазы роста о.е.; $Q_{\text{высота}}$– коэффициент влияния высоты съемки о.е.

Поправочный коэффициент качества ортофотоплана $Q_{\text{орто}}$ зависит от разрешения $Q_{\text{разреш}}$, контрастности и освещенности $Q_{\text{контраст}}$, геометрической четкости и погодных условий (засветка, облачность, тени).

Поправочный коэффициент разрешения определяется по формуле:

$$Q_{\text{разреш}} = e^{-\lambda_{\text{р}} \cdot GSD} \quad (3.9)$$

где $\lambda_{\text{р}}$ – эмпирический параметр, о.е. (принимаем в расчетах 0,1).

Коэффициент контрастности и освещенности $Q_{\text{контраст}}$ определяется по выражению:

$$Q_{\text{контраст}} = \frac{L_{\text{я}}}{L_{\text{я}max}} \quad (3.10)$$

где $L_я$ – стандартное отклонение яркости, кд/м^2; $L_{яmax}$ – максимальное отклонение яркости, кд/м^2.

Отсутствия искажений (геометрическая четкость) – может быть оценена через PSNR (Peak Signal–to–Noise Ratio) по формуле:

$$Q_{\text{геометр}} = 1 - \frac{1}{PRSN} \tag{3.11}$$

где $PRSN$ – метрика, используемая для оценки качества изображения, о.е.

PSNR – метрика, используемая для оценки качества изображения путем сравнения его с эталонным (идеальным) изображением. В контексте ортофотопланов она помогает оценить степень искажений и шумов (принимается в диапазоне от 20 до 40 дБ, где 20 дБ – заметный шум, требует фильтрации для точного распознавания растений, 40 дБ – практически незаметные искажения).

Погодные условия представляются коэффициентом $Q_{\text{погода}}$:

$$Q_{\text{погода}} = \begin{cases} 1 - \text{ясная погода} \\ 0{,}7 - \text{переменная облачность} \\ 0{,}3 - \text{пасмурно/дождь} \end{cases} \tag{3.12}$$

Учитывая все вышеперечисленные коэффициенты, получаем итоговое выражение для $Q_{\text{орто}}$:

$$Q_{ortho} = \alpha_{\text{орто}} \cdot Q_{\text{разреш}} + \beta_{\text{орто}} \cdot Q_{\text{контраст}} + \gamma_{\text{орто}} \cdot Q_{\text{геометр}} + \\ + \delta_{\text{орто}} \cdot Q_{\text{погода}} \tag{3.13}$$

где $\alpha_{\text{орто}}$, $\beta_{\text{орто}}$, $\gamma_{\text{орто}}$, $\delta_{\text{орто}}$ – весовые коэффициенты, о.е. (0,1–0,4).

Коэффициент фазы роста $Q_{\text{фаза}}$ – чем сложнее фаза, тем ниже распознавание:

$$Q_{\text{фаза}} = \begin{cases} 0{,}9 - \text{для фазы всходов} \\ 1{,}0 - \text{стеблевание} \\ 0{,}6 - \text{колошение, цветение} \\ 0{,}5 - \text{созревание} \end{cases}$$

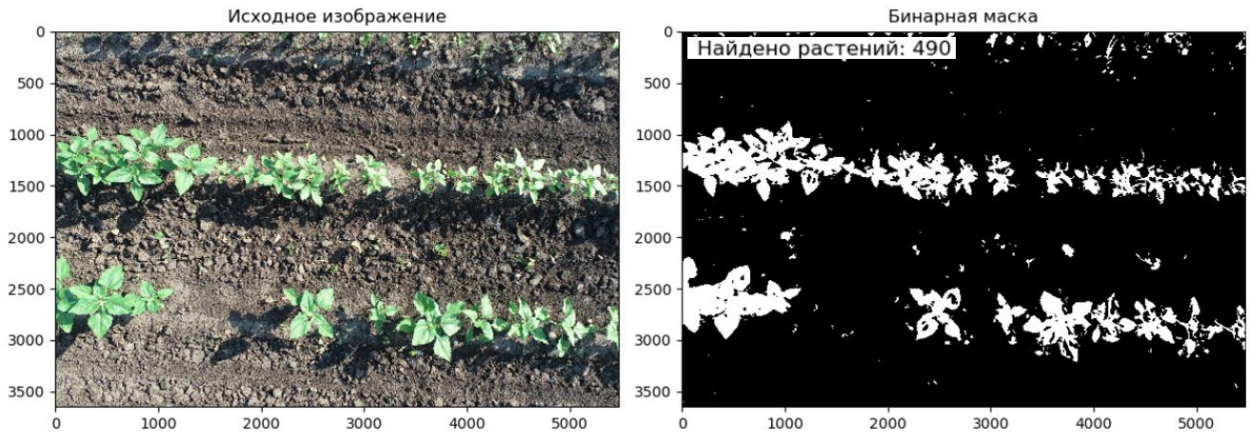
Коэффициент высоты съемки $Q_{\text{высота}}$ зависит от GSD и покрытия:

$$Q_{\text{высота}} = \begin{cases} 1{,}0 - \text{высота} \leq 50 \text{ м } (GSD < 1 \text{ см}) \\ 0{,}8 - 50 - 100 \text{ м } (GSD\ 1 - 2 \text{ см}) \\ 0{,}5 - 100 - 200 \text{ м } (GSD\ 2 - 5 \text{ см}) \\ 0{,}2 - > 200 \text{ м } (GSD > 5 \text{ см}) \end{cases}$$

Для разных культур и условий освещения может потребоваться настройка диапазон HSV и минимальной площади растения – параметры зависят от метеоусловий съемки и фазы развития растений. Для обработки в режиме реального времени возможно использовать видеопоток вместо статического изображения, но это потребует большие вычислительные мощности и увеличить стоимость операции. Подобная технология реализуется компанией DJI в программном комплексе Terra для работы со встроенными мультиспектральными камерами.

Для более точного подсчета можно использовать методы машинного обучения (например YOLO или Mask R–CNN). Для повышения точности распознавания необходимо различать сорную растительность и растения – объекты для распознавания. Для это требуется набор снимков культур в различных фазах и их ручная обработка. Так же необходимо определить оптимальное значение GSD, для этого производиться съемка на разных высотах и определяется процент эффективного распознавания [150].

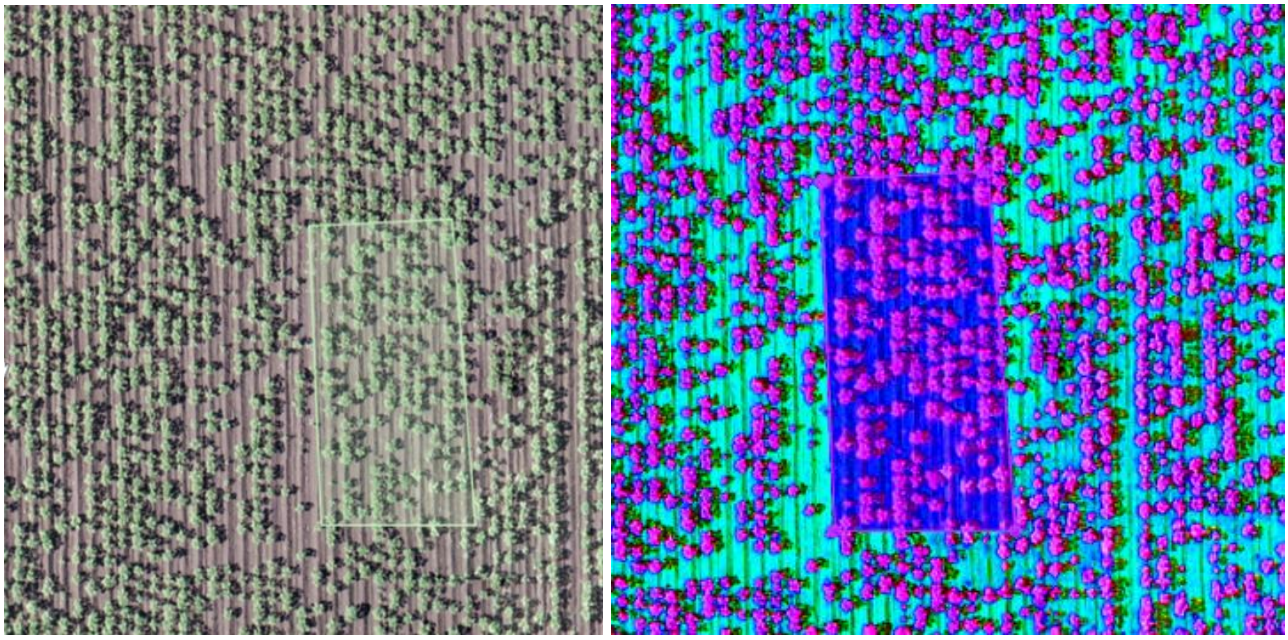
Для увеличения точности распознавания проводились наземные и воздушные измерения на примере подсолнечника и кукурузы (Приложение В). Высота съемки принималась 2 м, 5 м, 10 м, и далее с шагом в 5 м до высоты 50 метров (рисунок 3.15).



а) б)

Рисунок 3.15 - Изображения результатов распознавания: а) – исходное изображение; б) – бинарная маска

Для удобства расчётов так же можно воспользоваться возможностью применения цветовых фильтров для создания более наглядного отображения культур (рисунок 3.16).



а) б)

Рисунок 3.16 - Изображения контрольных участков для измерения густоты подсолнечника и подсчета количества растений: а) – RGB изображение; б) – цветовая фильтрация

Значения $Q_{\text{фаза}}$ для подсолнечника полученные опытным путем приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Учет фазы роста подсолнечника

Фаза роста	Характеристика фазы	$Q_{\text{фаза}}$
Всходы (VE–V2)	Мало листьев, слабая контрастность	0,6
3–6 листьев (V3–V6)	Растения различимы, но имеют малый размер	0,8
Стеблевание (V7–V12)	Хорошая детализация, высокая контрастность	1,0
Бутонизация (R1–R3)	Крупные листья, но возможны перекрытия	0,9
Цветение (R4–R6)	Яркие соцветия, но сложная текстура	0,7
Созревание (R7–R9)	Листья сохнут, возможны ложные срабатывания	0,5

Для принятых высот на примере БАС DJI Phantom 4, с известными характеристиками камеры, получены значения $Q_{\text{высота}}$, представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Высоты съемки для учета коэффициента высоты съемки $Q_{\text{высота}}$

Высота, м	GSD, см/px	$Q_{\text{высота}}$
2	0,29	1,0

Высота, м	GSD, см/px	$Q_{\text{высота}}$
5	0,73	0,95
10	1,46	0,9
15	2,19	0,8
20	2,92	0,7
25	3,65	0,6
30	4,38	0,5
35	5,11	0,4
40	5,84	0,3
45	6,57	0,2
50	7,30	0,1

Для примера расчета примем две фазы: стеблевание (высота съемки 10 м, хорошая погода) и цветение (высота 30 м, переменная облачность).

$$K_{\text{расп1}} = 0{,}9 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}9 \cdot 1{,}0 = 0{,}81 = 81\%$$

$$K_{\text{расп2}} = 0{,}9 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}5 \cdot 0{,}8 = 0{,}252 = 25{,}2\%$$

На основе представленной модели получим таблицы эффективности распознавания растений для подсолнечника и кукурузы во всех фазах развития при высотах от 2 до 50 метров и характеристиках БАС Phantom 4 (таблица 3.3 и 3.4). График зависимости эффективности распознавания подсолнечника и кукурузы в различных фазах представлен на рисунке 3.17 и 3.18.

Таблица 3.3 - Эффективность распознавания по фазам развития подсолнечника

Высота (м)	Всходы (VE–V2)	3–6 листьев (V3–V6)	Стеблевание (V7–V12)	Бутонизация (R1–R3)	Цветение (R4–R6)	Созревание (R7–R9)
2	60	75	95	90	85	50
5	55	70	90	85	80	45
10	45	65	85	80	70	40
15	35	55	75	70	60	35
20	25	45	65	60	50	30
25	20	35	55	50	40	25
30	15	30	45	40	30	20
35	10	25	35	30	25	15
40	8	20	25	20	20	10
45	5	15	20	15	15	8
50	3	10	15	10	10	5

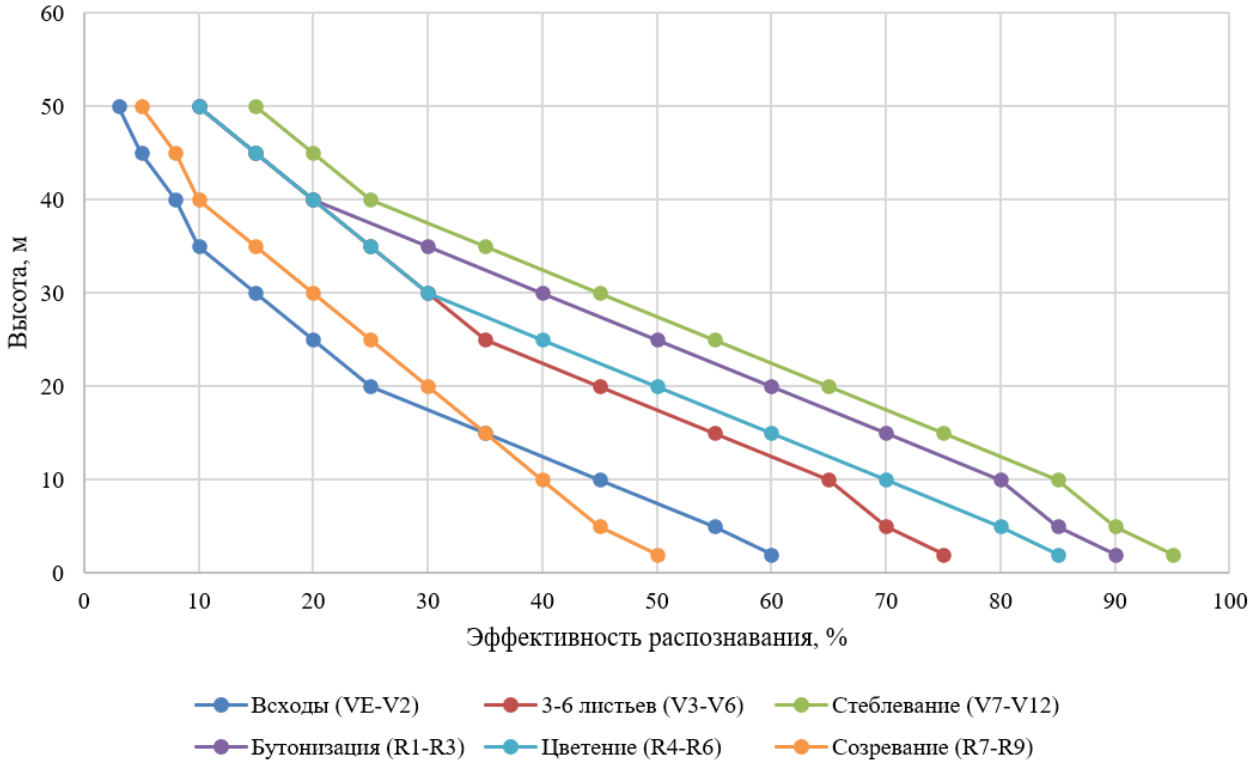


Рисунок 3.17 - График зависимости эффективности распознавания подсолнечника в различных фазах

Таблица 3.4 - Таблица эффективности распознавания по фазам развития кукурузы

Высота (м)	Всходы (VE–V2)	3–6 листьев (V3–V6)	7–10 листьев (V7–V10)	Выход в трубку (V11–V14)	Выметывание (R1–R2)	Молочная спелость (R3–R4)	Восковая спелость (R5–R6)
2	65	80	90	97	88	70	50
5	60	75	87	92	83	65	45
10	50	70	83	87	75	60	40
15	40	60	77	80	65	50	35
20	30	50	67	70	55	40	30
25	25	40	57	60	45	35	25
30	20	35	47	50	35	30	20
35	15	30	37	40	30	25	15
40	10	25	27	30	25	20	10
45	8	20	22	25	20	15	8
50	5	15	17	20	15	10	5

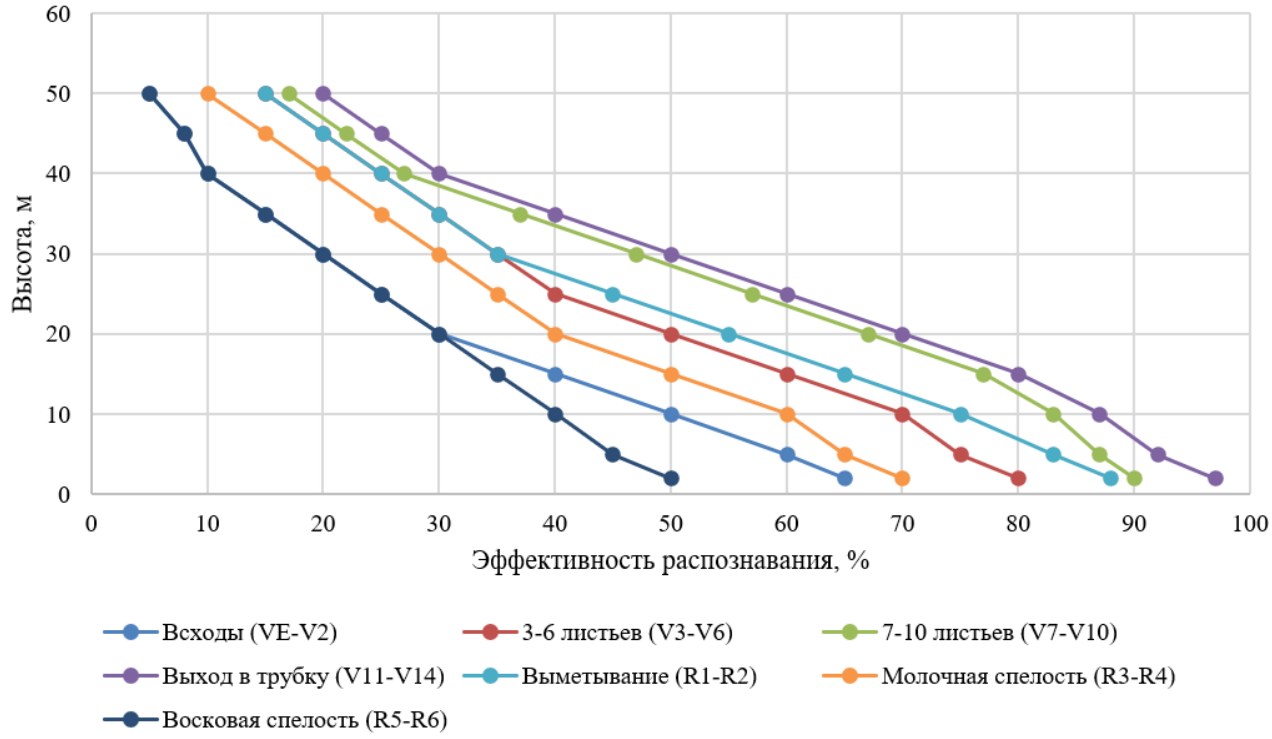


Рисунок 3.18 - График зависимости эффективности распознавания кукурузы в различных фазах

На основании полученных данных можно сделать практические рекомендации для точного подсчета количества растений: оптимальная высота 2–10 м, для мониторинга состояния 10–20 м, для крупномасштабной съемки не более 30 м. При этом кукуруза лучше распознается в ранних и средних фазах, подсолнечник имеет более резкое падение эффективности при цветении.

Рекомендуемые значения GSD для различных задач приведены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Рекомендуемые значения GSD для разных задач

Задача	Оптимальный GSD	Примечания
Общий мониторинг полей	5–10 см/px	Подходит для оценки состояния посевов, NDVI–анализа
Подсчет растений	1–3 см/px	Позволяет различать отдельные растения
Определение всхожести	0,5–2 см/px	Требуется для ранних фаз развития
Диагностика болезней/вредителей	0,3–1 см/px	Подходит для выявления мелких дефектов
Селекция и фенотипирование	< 0,5 см/px	Максимальная детализация для анализа листьев, цветков, факторов вредоносности

Оптимальные параметры для мониторинга подсолнечника приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 - Оптимальные параметры для мониторинга подсолнечника

Фаза роста	Размер растения, см	GSD, см/px	Высота, м	Цель съемки
Всходы (VE)	2–5	0,3–0,7	18–25	Подсчет всхожести
4–6 листьев (V4–V6)	10–20	0,7–1,5	27–32	Оценка густоты
Бутонизация (R1)	30–50	1,5–3	30–37	Контроль развития
Цветение (R5–R6)	15–30	2–4	40–45	Подсчет цветков
Созревание (R7–R9)	30–50	3–5	50–80	Мониторинг спелости

Значения высоты для разных GSD при применении БАС приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 - Значения высоты для разных GSD при применении БАС

Модель	Высота при различных GSD					
	0,5 см/ px (м)	0,7 см/ px (м)	2 см/ px (м)	3 см/ px (м)	4 см/ px (м)	5 см/ px (м)
Phantom 4 Pro	18	25	73	110	146	183
Mavic Air 2	11	15	47	70	94	118
Mavic 2 Pro	21	30	86	129	172	215
Mavic 3 Enterprise	26	36	104	156	208	260
Matrice 300 + P1	40	56	159	239	318	398

Эффективность распознавания по моделям БАС приведена в таблице 3.8. Результаты распознавания растений и график зависимости эффективности распознавания для различных БАС представлены на рисунках 3.19 и 3.20.

Таблица 3.8 - Таблица эффективности распознавания по моделям БАС

Высота, м	P4 (RGB)	P4 Multispec	Mavic (RGB)	Mavic 2 (RGB)	Mavic 3 (RGB)	Mavic 3 Multispec	Matrice 300 (RGB)	Matrice 30 (Multispec)
2	92	94	90	93	95	96	96	97
5	90	93	88	91	93	95	94	96
10	85	90	82	87	90	92	91	94
15	78	85	75	80	85	88	87	90
20	70	78	65	72	78	82	80	85
25	60	70	55	63	70	75	72	78
30	50	63	45	55	63	68	65	72

Высота, м	P4 (RGB)	P4 Multispec	Mavic (RGB)	Mavic 2 (RGB)	Mavic 3 (RGB)	Mavic 3 Multispec	Matrice 300 (RGB)	Matrice 30 (Multispec)
35	40	55	35	45	55	60	58	65
40	30	48	25	35	48	53	50	58
45	20	40	15	25	40	45	42	50
50	15	35	10	20	35	40	38	45



Рисунок 3.19 - Изображение результата распознавания растений и подсчета количества

На основе полученных данных можно сделать вывод: для подсчета количества растений с наибольшей эффективностью из рассматриваемых моделей стоит применить БАС Mavic 3 Enterprise, из–за соотношения качества и высоты. Для мониторинга больших площадей (3–5 см/px) наиболее эффективная модель DJI Matrice 300 + P1 с максимальной детализацией на больших высотах. С точки зрения экономии – наиболее бюджетный вариант – DJI Phantom 4 Pro.

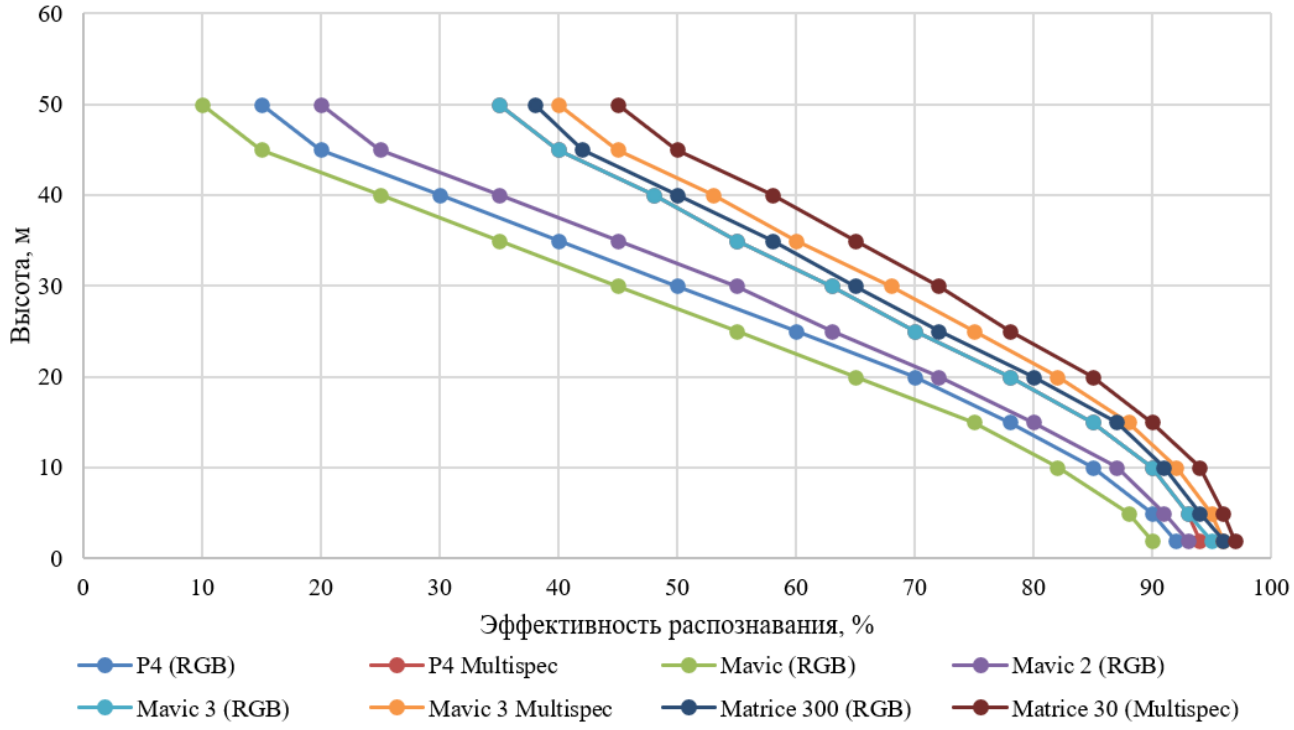


Рисунок 3.20 - График зависимости эффективности распознавания для различных БАС

Для простоты решения инженерной задачи расчета эффективности распознавания в зависимости от размера растения и характеристик камеры на БПЛА, на основании данных, скорректирована формула из главы 2.6 для определения искомой вероятности распознавания:

$$K_{\text{расп}} = \left[E_{max} \cdot e^{-\lambda_{\text{д}}\left(\frac{h_n \cdot p}{f \cdot S_{\text{об}}}\right)}\right] \cdot \left[1 - \frac{1}{1 + e^{-k_{\text{р}} \cdot (S_{\text{об}} - S_0)}}\right] \cdot Q_{env} \qquad (3.14)$$

где E_{max} – максимальная эффективность для данного типа растения, % (опытным путем получено для кукурузы – 97%, подсолнечника – 95 %); $\lambda_{\text{д}}$ – коэффициент деградации разрешения, (принимаем 0,2); S_0 – пороговый размер для распознавания, м; $k_{\text{р}}$ – коэффициент, полученный по графическим зависимостям (5–10); Q_{env} – поправочный коэффициент условий съемки, о.е (0–1).

Так для подсолнечника в фазе V7–V12, $S_{\text{об}} \approx 0{,}8$ м, при технике Mavic 3 Enterprise на высоте 15 м:

$$K_{\text{расп}} = 95 \cdot e^{-0{,}2 \cdot 0{,}62} \cdot 0{,}98 = 82{,}3\%$$

Для кукурузы, фаза V7–V14, S ≈ 0,5 м:

$$K_{\text{расп}} = 97 \cdot e^{-0{,}2 \cdot 0{,}99} \cdot 0{,}95 = 75{,}6\%$$

Данные, полученные расчетным методом, согласуются с практически полученными, ошибка расчетов не превышает 10%.

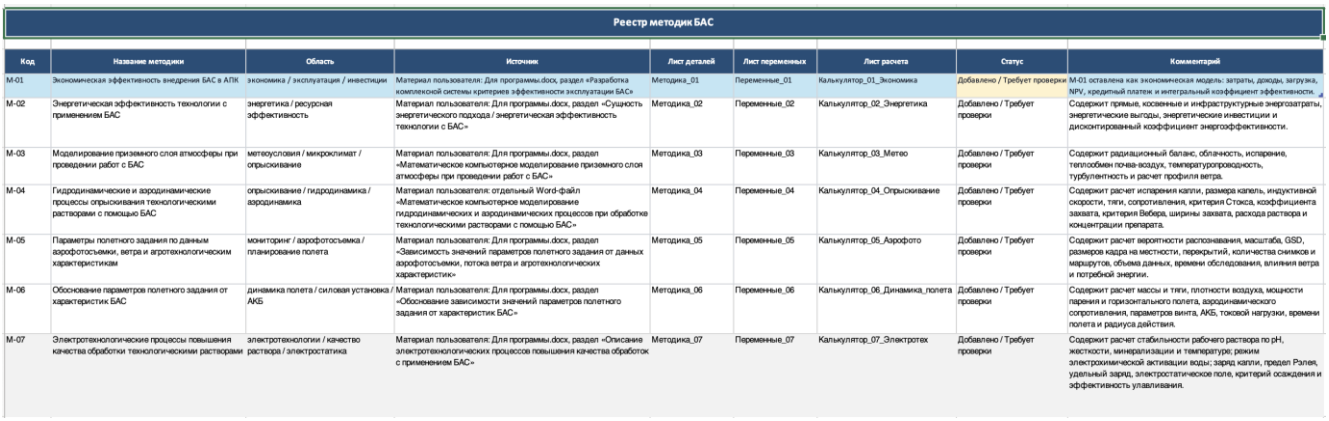
Раннее выявление проблем позволяет снизить потери урожая и перейти от сплошного к точечному способу выполнения агротехнологических операций. Внедрение предлагаемого решения влияет на коэффициент рентабельности инвестиций $K_{\text{рент}}$ на 0,7 о.е. через прирост урожая $K_{\text{у}}$ на 10-15%, что в свою очередь дает дополнительный доход $\text{П}_{\text{пр,БАС}}$. Снижение расхода препаратов при очаговых обработках возможно до 30%, это в свою очередь повышает коэффициент экономии водного ресурса $K_{\text{водрес}}$ на 0,4 о.е. Автоматический подсчет растений вместо ручного, увеличивает коэффициент производительности мониторинга $K_{\text{пром}}$ на 0,15 о.е. Суммарное влияние на критерий экономической эффективности $\text{К}_{\text{экэ}}$ - 1,25 о.е. (15,0%). С точки зрения энергетических затрат снижение потребности в вычислительных мощностях и времени на анализ (работа с масками вместо объемных «сырых» ГБ-файлов) через экономию на $E_{\text{данные}}$ и $E_{\text{сервер}}$ дает прирост критерия энергетической эффективности $\text{К}_{\text{энэ}}$ на 0,07 о.е. (8,1%). Окупаемость этого модуля ПО составляет менее одного сезона. Программа распознавания качества всходов переводит БАС из «средства общего мониторинга» в инструмент точной корректировки агротехнологий с ранней стадии развития культуры.

3.3 Программное обеспечение методологического справочника и инженерного калькулятора 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. Реализация выполнена в формате книги Microsoft Excel, где каждый расчетный модуль отделен от справочной и методической части (рисунок 3.21). Пользователь получает не только итоговые численные показатели, но и пояснение, какие

исходные данные участвуют в расчете, какие коэффициенты применены, какие проверки выполняются автоматически и какие ограничения должны быть учтены при инженерной интерпретации результата.

Книга объединяет семь методик: экономическую оценку внедрения БАС, энергетическую эффективность, моделирование метеоусловий, гидродинамику и аэродинамику опрыскивания, расчет параметров аэрофотосъемки, динамику полета и электротехнологические процессы повышения качества обработки растворами. Такое объединение позволяет рассматривать применение БАС как комплексную систему, где экономический эффект зависит от технической готовности аппарата, энергетических затрат, метеоусловий, качества проведения работ, параметров полетного задания и состояния рабочего раствора.



Реестр методик БАС

Код	Название методики	Область	Источник	Лист деталей	Лист переменных	Лист расчета	Статус	Комментарий
M-01	Экономическая эффективность внедрения БАС в АПК	экономика / эксплуатация / инвестиции	Материал пользователя: Для программы.docx, раздел «Разработка комплексной системы критериев эффективности эксплуатации БАС»	Методика_01	Переменные_01	Калькулятор_01_Экономика	Добавлено / Требует проверки	M-01 оставлена как экономическая модель: затраты, доходы, загрузка, NPV, кредитный платеж и интегральный коэффициент эффективности.
M-02	Энергетическая эффективность технологии с применением БАС	энергетика / ресурсная эффективность	Материал пользователя: Для программы.docx, раздел «Сущность энергетического подхода / энергетическая эффективность технологии с БАС»	Методика_02	Переменные_02	Калькулятор_02_Энергетика	Добавлено / Требует проверки	Содержит прямые, косвенные и инфраструктурные энергозатраты, энергетические выгоды, энергетические инвестиции и дисконтированный коэффициент энергоэффективности.
M-03	Моделирование приземного слоя атмосферы при проведении работ с БАС	метеоусловия / микроклимат / опрыскивание	Материал пользователя: Для программы.docx, раздел «Математическое компьютерное моделирование приземного слоя атмосферы при проведении работ с БАС»	Методика_03	Переменные_03	Калькулятор_03_Метео	Добавлено / Требует проверки	Содержит радиационный баланс, облачность, испарение, теплообмен почва-воздух, температуропроводность, турбулентность и расчет профиля ветра.
M-04	Гидродинамические и аэродинамические процессы опрыскивания технологическими растворами с помощью БАС	опрыскивание / гидродинамика / аэродинамика	Материал пользователя: отдельный Word-файл «Математическое компьютерное моделирование гидродинамических и аэродинамических процессов при обработке технологическими растворами с помощью БАС»	Методика_04	Переменные_04	Калькулятор_04_Опрыскивание	Добавлено / Требует проверки	Содержит расчет испарения капли, размера капель, индуктивной скорости, тяги, сопротивления, критерия Стокса, коэффициента захвата, критерия Вебера, ширины захвата, расхода раствора и концентрации препарата.
M-05	Параметры полетного задания по данным аэрофотосъемки, ветра и агротехнологическим характеристикам	мониторинг / аэрофотосъемка / планирование полета	Материал пользователя: Для программы.docx, раздел «Зависимость значений параметров полетного задания от данных аэрофотосъемки, потока ветра и агротехнологических характеристик»	Методика_05	Переменные_05	Калькулятор_05_Аэрофото	Добавлено / Требует проверки	Содержит расчет вероятности распознавания, масштаба, GSD, размеров кадра на местности, перекрытий, количества снимков и маршрутов, объема данных, времени обследования, влияния ветра и потребной энергии.
M-06	Обоснование параметров полетного задания от характеристик БАС	динамика полета / силовая установка / АКБ	Материал пользователя: Для программы.docx, раздел «Обоснование зависимости значений параметров полетного задания от характеристик БАС»	Методика_06	Переменные_06	Калькулятор_06_Динамика_полета	Добавлено / Требует проверки	Содержит расчет массы и тяги, плотности воздуха, мощности парения и горизонтального полета, аэродинамического сопротивления, параметров винта, АКБ, токовой нагрузки, времени полета и радиуса действия.
M-07	Электротехнологические процессы повышения качества обработки технологическими растворами	электротехнологии / качество раствора / электростатика	Материал пользователя: Для программы.docx, раздел «Описание электротехнологических процессов повышения качества обработок с применением БАС»	Методика_07	Переменные_07	Калькулятор_07_Электротех	Добавлено / Требует проверки	Содержит расчет стабильности рабочего раствора по pH, жесткости, минерализации и температуре; режим электрохимической активации воды; заряд капли, предел Рэлея, удельный заряд, электростатическое поле, критерий осаждения и эффективность улавливания.

Рисунок 3.21 - Скриншот программы с реестром методик

Пользовательская аудитория - инженер, технолог, оператор БАС, агроном, геодезист, механизатор, преподаватель, которому требуется быстро получить воспроизводимый расчет и пояснить его структуру. Для корректного применения необходимы исходные данные по участку, культуре, аппарату, аккумуляторным батареям, погоде, параметрам опрыскивания, свойствам раствора и требованиям к результату обработки или съемки.

Перед началом работы следует открыть книгу Excel и сохранить ее копию под названием конкретного проекта или сценария. Это необходимо, чтобы исходная методическая версия осталась неизменной. В названии копии рекомендуется

указывать дату, культуру или объект, номер участка, тип БАС и номер сценария. Например: «БАС_опрыскивание_пшеница_участок_12_сценарий_01.xlsx».

Исходная книга содержит информационный лист «README», реестр методик, методические таблицы, листы переменных, справочники коэффициентов и рабочие калькуляторы. В «README» указано, что методология перенесена из авторских Word-материалов, а спорные места и инженерные допущения помечены статусами «Требует проверки» или «Справочно». Поэтому при оформлении результатов необходимо разделять расчетные значения, справочные допущения и показатели, подтвержденные внешними нормативными или экспериментальными данными. Интерфейсом программы является структура листов и ячеек книги, а рабочим сценарием - заполнение входных параметров на листах «Калькулятор» с последующим анализом расчетных показателей и автоматических статусов.

Логика программы построена по схеме «методика → переменные → справочник → калькулятор». Методический лист фиксирует формулы и смысл показателей. Лист переменных раскрывает обозначения, единицы измерения и тип параметра: входной параметр, расчетная величина, справочный коэффициент или выходной показатель. Справочник содержит диапазоны, коэффициенты и критерии. Калькулятор является рабочей зоной, где пользователь меняет исходные данные и получает результаты.

Расчетные листы построены единообразно: в левой части находятся входные параметры, их значения, единицы измерения и комментарии; в правой части - расчетные показатели, численные значения, единицы измерения и проверочный статус. Это снижает риск ошибочного ввода, упрощает сравнение сценариев и позволяет быстро определить, какие исходные данные влияют на конкретный результат.

Результаты программы представлены в виде числовых показателей и текстовых статусов. Числовые показатели используются для дальнейшего инженерного анализа, а статусы служат предварительной автоматической интерпретацией. Например, статус может указать на низкую загрузку БАС, недостаточную эффективность осаждения, превышение допустимого расхода,

нехватку энергии аккумулятора или необходимость корректировки режима электроактивации воды.

Каждая методика может использоваться отдельно, однако на практике модули взаимосвязаны. Модуль М-01 предназначен для сопоставления традиционной технологии и технологии с применением БАС по эксплуатационным затратам, дополнительному доходу, капитальным инвестициям и финансовой устойчивости (рисунок 3.22). В расчете учитываются затраты труда, ГСМ, ремонт, амортизация, материалы, расходы на персонал БАС, электроэнергию, обслуживание, программное обеспечение, аккумуляторы и прочие затраты. Отдельно рассчитываются снижение затрат, эффект от сохраненного урожая, экологический эффект, годовой экономический эффект, NPV, кредитный платеж и набор коэффициентов эффективности. Практическая задача модуля - дать предварительный ответ, является ли проект внедрения БАС экономически целесообразным при заданной площади, урожайности, цене продукции, загрузке, капитальных затратах и параметрах финансирования. Особое внимание следует уделять коэффициентам поэтапности внедрения, риску, загрузке и источнику прироста урожая, так как именно они существенно меняют итоговый интегральный коэффициент. Для М-01 следует заранее подготовить данные по площади применения, урожайности, цене продукции, приросту урожая или снижению потерь, традиционным эксплуатационным затратам, затратам БАС, инвестициям, ставке дисконтирования и условиям кредита. После расчета необходимо проверить не только NPV и ROI, но и загрузку БАС, финансовую устойчивость и интегральный коэффициент. Если загрузка низкая, экономический эффект может быть завышен или нестабилен.

Модуль М-02 оценивает энергозатраты технологии с БАС относительно традиционной технологии. В модели выделены энергоемкость агрегата, прямые затраты генератора, энергетические затраты труда, транспортировка, инфраструктура, серверная обработка, связь, утилизация, энергетические выгоды от оптимизации, сохраненного урожая и экологических факторов. Итоговыми показателями выступают полные удельные энергозатраты, коэффициент

энергетической эффективности и дисконтированный коэффициент. Модуль полезен для проектов, где требуется доказать не только финансовую, но и ресурсную целесообразность перехода на БАС. При применении необходимо подтверждать энергоэквиваленты, нормативы, транспортные коэффициенты и доли косвенных затрат, поскольку в исходной книге часть таких параметров помечена как требующая проверки.

Для М-02 требуется определить границу энергетического баланса: какие операции входят в технологию, какие затраты считаются прямыми, какие относятся к инфраструктуре, серверной обработке, связи, транспортировке и утилизации. Особое внимание уделяется доле косвенных затрат и знаку энергетических выгод.

Калькулятор_01_Экономика — эффективность внедрения БАС

Входные параметры

Параметр	Значение	Ед. изм.	Комментарий
Общие параметры проекта			
Площадь применения БАС S	1000,00	га	Площадь, на которой сравнивается технология
Урожайность Y	45,00	ц/га	Средняя урожайность культуры
Цена продукции P_урожая	20,00	руб/кг	Цена реализации продукции
Прирост урожая / снижение потерь γ	10,00%	ед	0,10 = 10 %; требуется подтверждать агроданными
Базовая прибыль без БАС П_баз	15 000 000	руб/год	Для коэффициента качественного эффекта К3
Минимальный годовой денежный поток CF_min	3 000 000	руб/год	Для проверки финансовой устойчивости
Традиционная технология			
Оплата труда традиционной технологии	1 500 000	руб/год	Затраты обслуживающего персонала
Расход ГСМ традиционной технологии G_ГСМ	25000,00	л/год	Физический расход топлива
Цена ГСМ P_ГСМ	70,00	руб/л	Стоимость топлива
Ремонт и ТО традиционной технологии	500 000	руб/год	Ремонт и техническое обслуживание
Амортизация традиционной технологии	800 000	руб/год	Амортизационные отчисления
Вспомогательные материалы традиционной технологии	300 000	руб/год	Материалы и расходники
Норма внесения традиционная q_трад	200	л/га	Для качественного эффекта точечного внесения
Технология БАС			
Коэффициент поэтапности внедрения αt	80,00%	ед	Регулируемый коэффициент; числовые уровни требуют уточнения
Коэффициент риска k_риск	85,00%	ед	0,75–0,85 — процессы частично оплачены
Количество операторов БАС n_оп	2,00	чел	Операторы БАС
Годовая зарплата оператора ЗП_оп	900 000	руб/чел./год	С учетом начислений при необходимости
Количество аналитиков n_ан	1,00	чел	Можно задать 0
Годовая зарплата аналитика ЗП_ан	1 000 000	руб/чел./год	Если аналитик не нужен, задайте n_ан = 0
Потребление электроэнергии БАС E_эл	12000,00	кВт·ч/год	Зарядка АКБ и сопутствующее оборудование
Тариф электроэнергии T_эл	8,00	руб/кВт·ч	Тариф хозяйства
Замена аккумуляторов Z_АКБ	400 000	руб/год	Примерная ежегодная доля затрат на АКБ
Ремонт оборудования БАС Z_рем	350 000	руб/год	Ремонт БАС, датчиков, оборудования
Обновление ПО Z_ПО	200 000	руб/год	Подписки и обновления
Прочие затраты обслуживания Z_проч	100 000	руб/год	Прочие расходы
Амортизация БАС A_БАС	1 200 000	руб/год	Амортизация БАС и сопутствующего оборудования
Расходные материалы БАС Z_мат	150 000	руб/год	Реактивы, расходники, пробоотбор
Норма внесения БАС q_БАС	20	л/га	Для качественного эффекта точечного внесения
Загрузка БАС			
Фактическое время полезной работы Tфакт	800,00	ч/год	Мониторинг, съемка, опрыскивание и другие задачи
Общий фонд часов периода Tобщ	1972,00	ч/год	В Word приведен пример: 1972 ч для 2026 года
Время ТО и регламентов TТО	150,00	ч/год	Пример из Word
Погодные ограничения Tпогода	350,00	ч/год	Пример для ЮФО
Технические простои Tтех	50,00	ч/год	Пример из Word
Балансовая стоимость БАС B_бал	6 000 000	руб	Для убытка от недоиспользования
Ставка альтернативной доходности r_деп	12,00%	ед	Ставка депозита/ценных бумаг

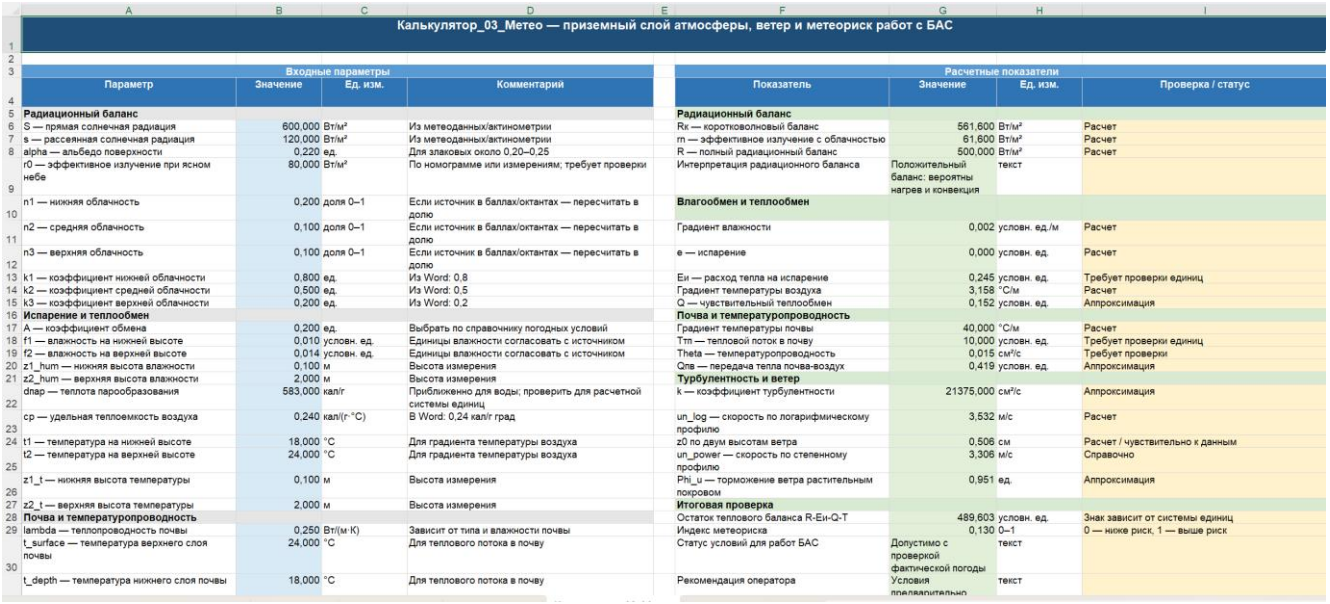
Расчетные показатели

Показатель	Значение	Ед. изм.	Проверка / статус
Эксплуатационные затраты			
Затраты ГСМ традиционной технологии	1 750 000	руб/год	Расчет
Сэксп_трад	4 850 000	руб/год	Расчет
Зперс_БАС	2 800 000	руб/год	Расчет
Взн_БАС	96 000	руб/год	Расчет
ЗТО_БАС	1 050 000	руб/год	Расчет
Сэксп_БАС до коэффициентов	5 296 000	руб/год	Расчет
Сэксп_БАС	3 601 280	руб/год	Расчет
Доход от снижения затрат	1 248 720	руб/год	Экономия затрат
Сохраненный урожай D_урожай	9 000 000	руб/год	Расчет
Tтах — эффективный фонд времени	1422,00	ч/год	Расчет
δ исходный	0,56	ед.	Расчет
δ — коэффициент загрузки БАС	56,26%	ед.	Низкая загрузка
Упр_БАС — недоиспользование	314 937	руб/год	Есть потери от недозагрузки
B_кач — качественный эффект	9 000	руб/год	Экономия/эффект
CO_2 традиционной технологии	66,25	т CO_2/год	Расчет
CO_2 технологии БАС	4,80	т CO_2/год	Расчет
Снижение выбросов CO_2	61,45	т CO_2/год	Снижение выбросов
B_эк — экологический эффект	-	руб/год	CO_2 не монетизирован
D_БАС — годовой экономический эффект	9 942 783	руб/год	Положительный годовой эффект
I0 — капитальные инвестиции	9 800 000	руб	Расчет
Годовой денежный поток для NPV	9 942 783	руб/год	Принято равным годовому эффекту D_БАС
NPV	22 755 592	руб	Проект эффективен по NPV
Ежегодный кредитный платеж	2 299 619	руб/год	Аннуитет
K1 — ROI	232,20%	ед.	Высокая рентабельность
K2 — годовая эффективность	2,76	ед.	Высокая операционная эффективность
K3 — качественный эффект	0,06%	ед.	Незначительный эффект
K_рес — замещение ресурсов	94,51%	ед.	Высокая экономия
Производительность БАС	75,00	га/ч	Расчет
K_прод — производительность	1,50	ед.	Высокая
K_экол — экологическая эффективность	92,75%	ед.	Высокая
K_БАС — комплексный коэффициент БАС	1,12	ед.	Высокая эффективность
K_уст — финансовая устойчивость	1,30	ед.	Удовлетворительная устойчивость
K_экз — интегральный коэффициент	1,50	ед.	Предварительно эффективно
Контроль: топливный эквивалент	230 000	кВт·ч/год	Справочно для сопоставления с электроэнергией БАС
Итоговая рекомендация	Проект предварительно допустим	текст	ОК

Рисунок 3.22 - Скриншот экрана модуля М-01

Модуль М-03 предназначен для расчетной оценки метеоусловий, влияющих на проведение работ с БАС. В него входят блоки радиационного баланса, облачности, испарения, теплообмена, теплового потока в почву, температуропроводности, турбулентности и профиля ветра. Модуль помогает оценить риск конвекции, инверсии, испарения, изменения скорости ветра на высоте полета и возможного ухудшения условий обработки. Выходные статусы модуля не должны восприниматься как замена фактического предвылетного метеоконтроля,

а дополняться им. Результат следует использовать как предварительную оценку, а окончательное решение принимать после измерения скорости и направления ветра, температуры, влажности, осадков, солнечной радиации и видимости непосредственно перед выполнением работ (рисунок 3.23).



Калькулятор_03_Метео — приземный слой атмосферы, ветер и метеориск работ с БАС

Входные параметры

Параметр	Значение	Ед. изм.	Комментарий
Радиационный баланс			
S — прямая солнечная радиация	600,000	Вт/м²	Из метеоданных/актинометрии
s — рассеянная солнечная радиация	120,000	Вт/м²	Из метеоданных/актинометрии
alpha — альбедо поверхности	0,220	ед.	Для злаковых около 0,20–0,25
r0 — эффективное излучение при ясном небе	80,000	Вт/м²	По номограмме или измерениям; требует проверки
n1 — нижняя облачность	0,200	доля 0–1	Если источник в баллах/октантах — пересчитать в долю
n2 — средняя облачность	0,100	доля 0–1	Если источник в баллах/октантах — пересчитать в долю
n3 — верхняя облачность	0,100	доля 0–1	Если источник в баллах/октантах — пересчитать в долю
k1 — коэффициент нижней облачности	0,800	ед.	Из Word: 0,8
k2 — коэффициент средней облачности	0,500	ед.	Из Word: 0,5
k3 — коэффициент верхней облачности	0,200	ед.	Из Word: 0,2
Испарение и теплообмен			
A — коэффициент обмена	0,200	ед.	Выбрать по справочнику погодных условий
f1 — влажность на нижней высоте	0,010	условн. ед.	Единицы влажности согласовать с источником
f2 — влажность на верхней высоте	0,014	условн. ед.	Единицы влажности согласовать с источником
z1_hum — нижняя высота влажности	0,100	м	Высота измерения
z2_hum — верхняя высота влажности	2,000	м	Высота измерения
dnap — теплота парообразования	583,000	кал/г	Приближенно для воды; проверить для расчетной системы единиц
cp — удельная теплоемкость воздуха	0,240	кал/(г·°C)	В Word: 0,24 кал/г·град
t1 — температура на нижней высоте	18,000	°C	Для градиента температуры воздуха
t2 — температура на верхней высоте	24,000	°C	Для градиента температуры воздуха
z1_t — нижняя высота температуры	0,100	м	Высота измерения
z2_t — верхняя высота температуры	2,000	м	Высота измерения
Почва и температуропроводность			
lambda — теплопроводность почвы	0,250	Вт/(м·К)	Зависит от типа и влажности почвы
t_surface — температура верхнего слоя почвы	24,000	°C	Для теплового потока в почву
t_depth — температура нижнего слоя почвы	18,000	°C	Для теплового потока в почву

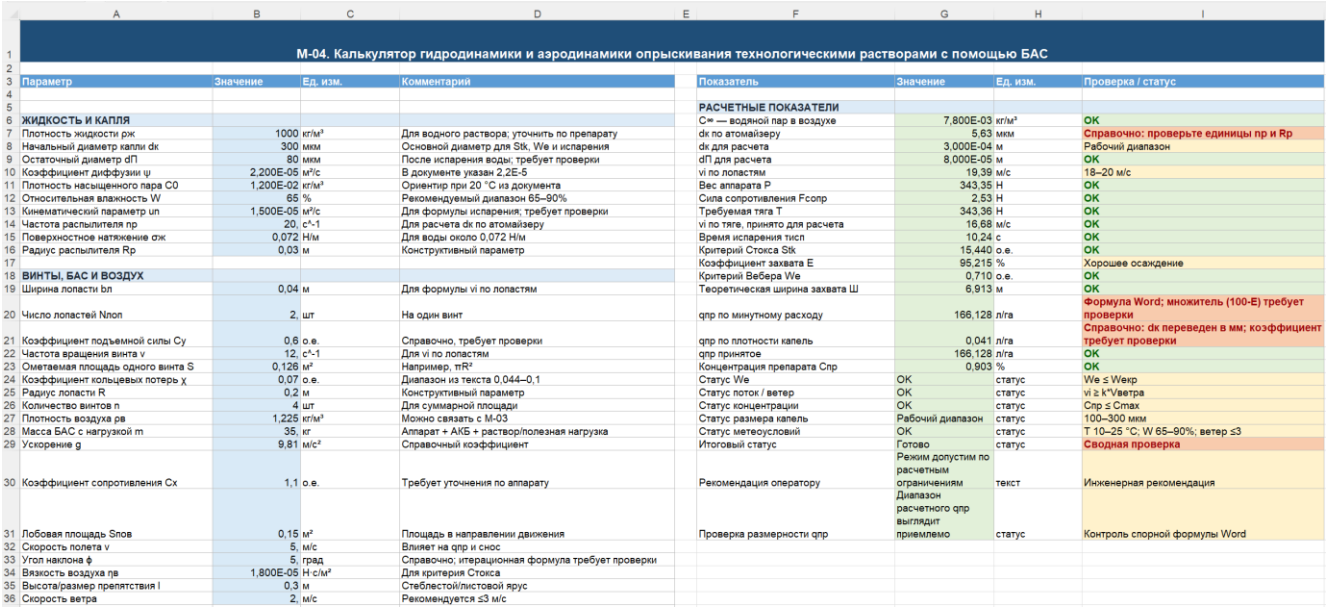
Расчетные показатели

Показатель	Значение	Ед. изм.	Проверка / статус
Радиационный баланс			
Rк — коротковолновый баланс	561,600	Вт/м²	Расчет
rn — эффективное излучение с облачностью	61,600	Вт/м²	Расчет
R — полный радиационный баланс	500,000	Вт/м²	Расчет
Интерпретация радиационного баланса	Положительный баланс: вероятны нагрев и конвекция	текст	
Влагообмен и теплообмен			
Градиент влажности	0,002	условн. ед./м	Расчет
e — испарение	0,000	условн. ед.	Расчет
Eи — расход тепла на испарение	0,245	условн. ед.	Требует проверки единиц
Tгр — тепловой поток в почву	10,000	условн. ед.	Требует проверки единиц
Theta — температуропроводность	0,015	см²/с	Требует проверки
Qпв — передача тепла почва-воздух	0,419	условн. ед.	Аппроксимация
Турбулентность и ветер			
k — коэффициент турбулентности	21375,000	см²/с	Аппроксимация
un_log — скорость по логарифмическому профилю	3,532	м/с	Расчет
z0 по двум высотам ветра	0,506	см	Расчет / чувствительно к данным
un_power — скорость по степенному профилю	3,306	м/с	Справочно
Phi_u — торможение ветра растительным покровом	0,951	ед.	Аппроксимация
Итоговая проверка			
Остаток теплового баланса R-Eи-Q-T	489,603	условн. ед.	Знак зависит от системы единиц
Индекс метеориска	0,130	0–1	0 — ниже риск, 1 — выше риск
Статус условий для работ БАС	Допустимо с проверкой фактической погоды	текст	
Рекомендация оператора	Условия предварительно	текст	

Рисунок 3.23 - Скриншот экрана модуля М-03

Модуль М-04 описывает гидродинамические и аэродинамические процессы при обработке растворами с помощью БАС. В нем рассчитываются скорость испарение капли, концентрация водяного пара, размер капли от атомайзера, индуктивная скорость потока, критерий Стокса, коэффициент захвата, критерий Вебера, ширина захвата, норма расхода рабочего раствора и концентрация препарата. Практический смысл модуля - проверить, достигает ли выбранный режим достаточного осаждения без чрезмерного сноса, отскока, испарения или превышения концентрации препарата. Итоговый статус «Готово» допустим, как расчетная рекомендация. При реальном применении он должен подтверждаться регламентом препарата, типом форсунок, результатами полевой проверки и ограничениями по погоде. Для М-04 исходные данные должны соответствовать реальному комплекту оборудования: тип распылителя, диаметр капель, расход, высота, скорость, ветер, температура, влажность, концентрация препарата и ограничения по рабочей жидкости (рисунок 3.24). При изменении высоты или

скорости необходимо повторно проверить ширину захвата, критерий Вебера, критерий Стокса, концентрацию и итоговый статус режима.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	**М-04. Калькулятор гидродинамики и аэродинамики опрыскивания технологическими растворами с помощью БАС**								
2									
3	**Параметр**	**Значение**	**Ед. изм.**	**Комментарий**		**Показатель**	**Значение**	**Ед. изм.**	**Проверка / статус**
4									
5						**РАСЧЕТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ**			
6	**ЖИДКОСТЬ И КАПЛЯ**					C_{∞} — водяной пар в воздухе	7,800E-03	кг/м³	**ОК**
7	Плотность жидкости ρж	1000	кг/м³	Для водного раствора; уточнить по препарату		dk по атомайзеру	5,63	мкм	**Справочно: проверьте единицы пр и Rp**
8	Начальный диаметр капли dk	300	мкм	Основной диаметр для Stk, We и испарения		dk для расчета	3,000E-04	м	Рабочий диапазон
9	Остаточный диаметр dП	80	мкм	После испарения воды; требует проверки		dП для расчета	8,000E-05	м	**ОК**
10	Коэффициент диффузии ψ	2,200E-05	м²/с	В документе указан 2,2E-5		vi по лопастям	19,39	м/с	18–20 м/с
11	Плотность насыщенного пара C0	1,200E-02	кг/м³	Ориентир при 20 °C из документа		Вес аппарата P	343,35	Н	**ОК**
12	Относительная влажность W	65	%	Рекомендуемый диапазон 65–90%		Сила сопротивления Fсопр	2,53	Н	**ОК**
13	Кинематический параметр un	1,500E-05	м²/с	Для формулы испарения; требует проверки		Требуемая тяга T	343,36	Н	**ОК**
14	Частота распылителя nр	20,	с^-1	Для расчета dk по атомайзеру		vi по тяге, принято для расчета	16,68	м/с	**ОК**
15	Поверхностное натяжение σж	0,072	Н/м	Для воды около 0,072 Н/м		Время испарения τисп	10,24	с	**ОК**
16	Радиус распылителя Rp	0,03	м	Конструктивный параметр		Критерий Стокса Stk	15,440	о.е.	**ОК**
17						Коэффициент захвата E	95,215	%	Хорошее осаждение
18	**ВИНТЫ, БАС И ВОЗДУХ**					Критерий Вебера We	0,710	о.е.	**ОК**
19	Ширина лопасти bл	0,04	м	Для формулы vi по лопастям		Теоретическая ширина захвата Ш	6,913	м	**ОК**
20	Число лопастей Nлоп	2,	шт	На один винт		qпр по минутному расходу	166,128	л/га	**Формула Word; множитель (100-E) требует проверки**
21	Коэффициент подъемной силы Cy	0,6	о.е.	Справочно, требует проверки		qпр по плотности капель	0,041	л/га	**Справочно: dk переведен в мм; коэффициент требует проверки**
22	Частота вращения винта v	12,	с^-1	Для vi по лопастям		qпр принятое	166,128	л/га	**ОК**
23	Сметаемая площадь одного винта S	0,126	м²	Например, πR²		Концентрация препарата Cпр	0,903	%	**ОК**
24	Коэффициент кольцевых потерь χ	0,07	о.е.	Диапазон из текста 0,044–0,1		Статус We	OK	статус	We ≤ Wекр
25	Радиус лопасти R	0,2	м	Конструктивный параметр		Статус поток / ветер	OK	статус	vi ≥ k*vветра
26	Количество винтов n	4	шт	Для суммарной площади		Статус концентрации	OK	статус	Cпр ≤ Cmax
27	Плотность воздуха ρв	1,225	кг/м³	Можно связать с M-03		Статус размера капель	Рабочий диапазон	статус	100–300 мкм
28	Масса БАС с нагрузкой m	35,	кг	Аппарат + АКБ + раствор/полезная нагрузка		Статус метеоусловий	OK	статус	T 10–25 °C; W 65–90%; ветер ≤3
29	Ускорение g	9,81	м/с²	Справочный коэффициент		Итоговый статус	Готово	статус	**Сводная проверка**
30	Коэффициент сопротивления Cx	1,1	о.е.	Требует уточнения по аппарату		Рекомендация оператору	Режим допустим по расчетным ограничениям	текст	Инженерная рекомендация
31	Лобовая площадь Sлоб	0,15	м²	Площадь в направлении движения		Проверка размерности qпр	Диапазон расчетного qпр выглядит приемлемо	статус	Контроль спорной формулы Word
32	Скорость полета v	5,	м/с	Влияет на qпр и снос					
33	Угол наклона ϕ	5,	град	Справочно; итерационная формула требует проверки					
34	Вязкость воздуха μв	1,800E-05	Н·с/м²	Для критерия Стокса					
35	Высота/размер препятствия l	0,3	м	Стеблестой/листовой ярус					
36	Скорость ветра	2,	м/с	Рекомендуется ≤3 м/с					

Рисунок 3.24 - Скриншот экрана модуля М-04

Модуль М-05 используется для расчета параметров мониторинга: вероятности распознавания объектов, масштаба, GSD, размеров кадра на местности, расстояния между снимками и маршрутами, количества снимков, количества маршрутов, объема данных, времени обследования, влияния ветра и потребной энергии. Модуль поддерживает анализ RGB/мультиспектральной съемки, гиперспектральных данных, тепловизора и лидара как отдельных расчетных случаев. Основная область применения - планирование обследования участка и оценка, соответствует ли выбранная высота, камера, перекрытие и скорость требуемому разрешению и энергетическим ограничениям. При недостатке энергии, чрезмерном объеме данных или несоответствии GSD программа формирует рекомендацию о корректировке задания. Для М-05 важно задать целевой GSD, параметры камеры, высоту съемки, перекрытия, размеры участка, скорость полета, ветер, мощность оборудования и доступную энергию. Если расчет показывает большой объем данных или нехватку АКБ, корректируются высота, перекрытия, скорость, маршрутная схема, число вылетов или комплект батарей.

Модуль М-06 рассчитывает параметры полета БАС с учетом массы, тяги, ометаемой площади винтов, плотности воздуха, индуктивной скорости, мощности парения, аэродинамического сопротивления, мощности горизонтального полета, частоты вращения винта, эффективности пропеллера, токовой нагрузки и характеристик аккумуляторного блока. На выходе формируются время полета, запас энергии, максимальный ток, рекомендуемый радиус действия и статусы проверки. Модуль необходим для проверки физической реализуемости задания, рассчитанного в других частях программы. Например, параметры обработки или съемки могут быть технологически корректными, но невыполнимыми из-за нехватки мощности, превышения тока, малого времени полета или недостаточного резерва на возврат. Для М-06 следует использовать фактические характеристики БАС: масса корпуса, полезная нагрузка, число винтов, диаметр винта, параметры батарей, показатель C-rate, максимальная мощность, скорость полета и резерв энергии. Если расчетный ток или мощность близки к предельным значениям, сценарий необходимо рассматривать как рискованный и подтверждать испытаниями.

Модуль М-07 объединяет расчет стабильности рабочего раствора, электрохимической активации воды и электростатического осаждения капель. В блоке качества раствора оцениваются pH, концентрации ионов, жесткость, минерализация, температурное разложение, сохранение и потеря концентрации действующего вещества. В блоке ЭХАВ рассчитываются ток, температура выхода, pH анолита, мощность и удельные энергозатраты. В блоке электростатики оцениваются заряд капли, предел Рэлея, удельный заряд, аэродинамические силы, электрическое поле, условие осаждения, эффективность улавливания и интегральный критерий оптимизации. Модуль особенно чувствителен к коэффициентам и размерностям. В исходной книге часть формул по ЭХАВ и электростатике помечена как требующая проверки. Поэтому результаты М-07 следует использовать как инженерную модель для подбора параметров установок и режимов работы, а не как окончательное подтверждение химической совместимости или безопасности препарата.

Для каждого модуля рекомендуется начинать работу не с калькулятора, а с методического листа и листа переменных. Это снижает риск неверной трактовки единиц измерения. После проверки переменных пользователь переходит на лист калькулятора, изменяет входные значения и анализирует правую расчетную часть.

В книге используется цветовая логика, указанная на листе «README» (рисунок 3.25). Синие ячейки предназначены для изменяемых входных данных пользователя. Зеленые ячейки содержат расчетные показатели, заданные Excel-формулами. Серые зоны используются для пояснений и справочных блоков. Желтые и оранжевые зоны обозначают проверки, коэффициенты, спорные места или допущения, которые требуют инженерной валидации. Основное правило работы - пользователь изменяет только входные значения в синих зонах. Расчетные ячейки, статусы, формулы и справочные коэффициенты не следует изменять без осознанной корректировки методики. Если требуется проверить альтернативный коэффициент, рекомендуется сначала сохранить копию файла или отдельный вариант сценария.

Калькулятор М-07. Электротехнологии: качество раствора, ЭХАВ, электростатическое осаждение							
Параметр	Значение	Ед. изм.	Комментарий	Показатель	Значение	Ед. изм.	Проверка / статус
Блок 1. Рабочий раствор и стабильность препарата				**Блок 1. Стабильность рабочего раствора**			
Тип препарата	Гербициды	категория	Справочно; для выбора целевого pH и интерпретации.	[H+]	6,310E-08	моль/л	расчет
pH исходной воды	7,2	ед. pH	Измеряемый входной параметр.	[OH-]	1,585E-07	моль/л	расчет
Целевой pH, нижняя граница	5	ед. pH	Общий ориентир; уточнить по препарату.	k_гидр	1,000E-03	1/ч	уравнение Бренстеда
Целевой pH, верхняя граница	5,5	ед. pH	Общий ориентир; уточнить по препарату.	k_компл	8,000E-01	1/ч	жесткость воды
Температура раствора	25	°C	Температура приготовления/хранения раствора.	Индекс минерализации I	4,500E-01	о.е.	TDS * коэффициент
Время хранения/экспозиции	1	ч	Время до применения после приготовления.	k_соль	4,500E-04	1/ч	минерализация
Начальная концентрация C0	100	%	Можно задавать 100% как исходную концентрацию.	T_K	2,982E+02	K	перевод температуры в K
k0 — базовая постоянная гидролиза	0,001	1/ч	Эмпирический коэффициент, требует проверки.	k_терм	1,538E-13	1/ч	уравнение Аррениуса
kH — кислотный коэффициент	0,05	1/(ч·моль/л)	Эмпирический коэффициент.	k_сумм	8,015E-01	1/ч	сумма вкладов
kOH — щелочной коэффициент	0,1	1/(ч·моль/л)	Эмпирический коэффициент.	C(t)	44,87	%	концентрация через время t
Ca2+	2	ммоль/л	Концентрация кальция.	Сохранение концентрации	44,87	%	C(t)/C0
Mg2+	1	ммоль/л	Концентрация магния.	Потеря концентрации	55,13	%	1 - C(t)/C0
alpha	0,2	о.е.	Коэффициент комплексообразования с Ca2+.	Статус pH	Риск: щелочная среда, возможен гидролиз	текст	автопроверка
beta	0,4	о.е.	Коэффициент комплексообразования с Mg2+.	Статус температуры	OK: температура допустима	текст	автопроверка
Минерализация TDS	450	ppm	Высокая минерализация >500 ppm — риск.	Статус TDS	OK: TDS допустим	текст	автопроверка

Рисунок 3.25 - Изображение с примером цветовой маркировки

Статусы являются частью интерфейса, так как они переводят числовые расчеты в понятные сообщения для пользователя. Статус может быть простым, например «ОК» или «Расчет», либо развернутым, например «Низкая загрузка», «Не хватает АКБ», «Требуется корректировка воды/режима», «Риск распада капли» или «Проект предварительно допустим». При анализе результата следует читать статус вместе с числовым значением, единицами измерения и исходными параметрами, которые привели к этому статусу. Если статус указывает на риск или необходимость проверки, пользователь должен вернуться к входным данным соответствующего блока, изменить сценарий или подтвердить параметр внешним источником. Например, при недостаточной эффективности осаждения в М-07 проверяются напряжение, размер капель, скорость контакта, расход раствора и производительность. При нехватке энергии в М-05 проверяются высота, скорость, перекрытие, масса оборудования, емкость АКБ и резерв.

После завершения расчета необходимо сохранить файл с понятным именем и зафиксировать входные данные, ключевые выходные показатели и итоговую рекомендацию. Для отчетности рекомендуется сделать скриншоты: общий вид выбранного калькулятора, зона входных параметров, зона расчетных показателей, итоговые статусы и при необходимости лист справочника с используемыми коэффициентами. Если расчет является проектным, к отчету прикладываются источники исходных данных: прайс-листы, технический паспорт БАС, паспорт аккумуляторов, регламент препарата, метеоданные, технологическая карта и результаты полевых измерений.

Для сравнения нескольких сценариев не рекомендуется перезаписывать один и тот же лист без сохранения копий. Лучше вести отдельные файлы или отдельную таблицу сценариев, где указываются измененные параметры и итоговые показатели. Такой подход позволяет восстановить ход анализа и объяснить, почему был выбран конкретный режим или вариант внедрения.

Контроль корректности включает четыре уровня. Первый уровень - проверка единиц измерения перед вводом данных. Второй - проверка диапазонов и справочных коэффициентов по листу «Справочник». Третий - анализ

автоматических статусов в калькуляторе. Четвертый - инженерная оценка результата специалистом, который понимает физический смысл показателей и ограничения методики. Основные ошибки пользователей приведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 - Типовые ошибки пользователя

Ошибка	Описание и последствия
Изменение формул	Пользователь вводит число в расчетную ячейку вместо входной. Последствие - нарушается автоматический расчет и статусы становятся недостоверными.
Смешение долей и процентов	Ввод 10 вместо 0,10 или наоборот. Последствие - завышение прироста урожая, коэффициентов, потерь или эффективности.
Неверная размерность капель	Использование мкм, мм и м без пересчета. Последствие - ошибочные Stk, We, заряд, масса капли и расход.
Игнорирование статуса «Требует проверки»	Расчет используется как окончательный без подтверждения коэффициента. Последствие - риск неверного проектного решения.
Работа без копии файла	Исходная книга перезаписывается данными одного сценария. Последствие - теряется методическая база и история расчетов.
Неполный учет ограничений БАС	Проверяется только технологический показатель, но не мощность, ток, время полета и резерв. Последствие - режим может быть невыполним в полете.

Если результат кажется физически неправдоподобным, не следует вручную исправлять расчетную ячейку. Правильный порядок действий: проверить исходные значения, единицы измерения, справочный коэффициент, формулу на методическом листе и комментарий к спорному месту. Только после этого можно корректировать методику, сохраняя отдельную версию файла.

Последовательность выполнения расчета.

Этап 1 - оформить исходный сценарий. Заполнить паспорт расчета: хозяйство или объект, культура, операция, расчетная площадь, период, тип БАС, вид полезной нагрузки и требуемый результат. На этом же шаге выбрать базовую технологию для сравнения и единицы измерения, чтобы далее не смешивать гектары, квадратные метры, литры, килограммы и энергетические единицы.

Этап 2 - ввести метеоограничения и условия работы. Сначала проверить М-03, поскольку ветер, температура, влажность и турбулентность могут сделать дальнейший технологический расчет недопустимым. Если статус указывает

высокий риск сноса, испарения, инверсии или перегрева, корректируется окно работ, высота, скорость, размер капли или операция переносится.

Этап 3 - проверить летную реализуемость. В М-06 вводятся масса аппарата, полезная нагрузка, параметры винтов и АКБ. До расчета маршрутов и экономики необходимо убедиться, что мощность горизонтального полета ниже доступной, токовая нагрузка допустима, расчетное время полета превышает минимальный порог, а энергетический резерв достаточен для возврата и посадки.

Этап 4 - рассчитать технологический режим. Для мониторинга используется М-05: по размеру участка, GSD, камере, высоте и перекрытиям определяется маршрут, число снимков, объем данных и время обследования. Для внесения раствора используется М-04: по свойствам жидкости, капле, скорости, ветру, форсункам и дозе проверяются осаждение, снос, концентрация и ширина захвата. Если применяется подготовка раствора или электростатическая подзарядка, дополнительно заполняется М-07.

Этап 5 - оценить ресурсную и энергетическую эффективность. В М-02 вводятся энергетические затраты традиционного способа и БАС, включая транспорт, обработку данных, зарядную инфраструктуру, труд, утилизацию и энергетические выгоды от оптимизации. Основная проверка — положительное значение энергетического эффекта и отсутствие чрезмерной доли косвенных затрат.

Этап 6 - выполнить экономический расчет. М-01 заполняется после технологических листов, так как экономика должна опираться на уже проверенный режим БАС. Вводятся фактические затраты, инвестиции, фонд полезной работы, простои, кредитные условия, тарифы и ожидаемые эффекты. На выходе анализируются годовой эффект, NPV, коэффициенты производительности, экологичности и финансовой устойчивости.

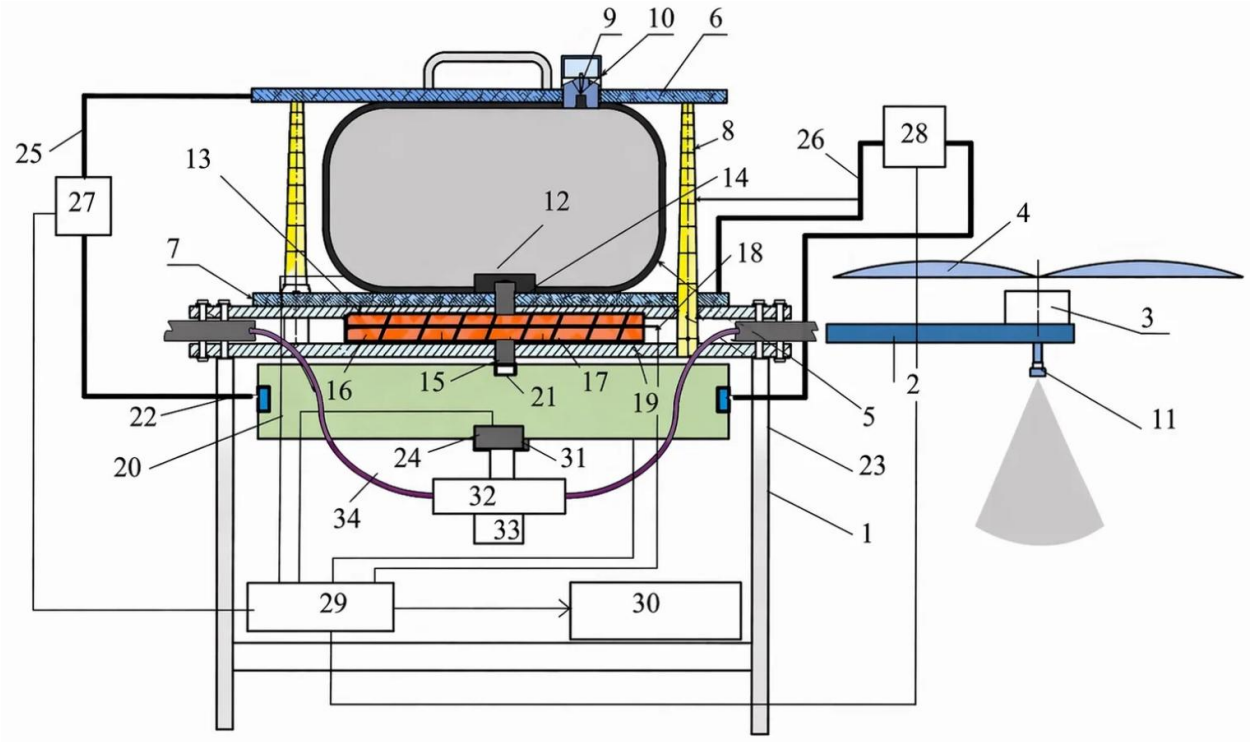
Этап 7 - провести итерацию и зафиксировать результат. Если хотя бы один ключевой статус имеет смысл «проверить» или «требуется корректировка», меняется не формула, а исходный параметр: скорость, высота, полезная нагрузка, емкость АКБ, размер капли, расход, окно работ, стоимость, ставка или количество

вылетов. После каждой корректировки сохраняется отдельная версия сценария и кратко фиксируется причина изменения.

Внедрении данного калькулятора на производстве повлечет за собой увеличение капитальных инвестиции в части затрат на ПО (50 000 руб.) и обучение (10 000 руб.), увеличатся показатели удельное энергопотребление персонала и инфраструктуры (на 13% и 7% соответственно). Этот рост будет скомпенсирован перераспределением трудовых обязанностей с соответствующим снижаем затрат на оплату труда и повышением эффективности принимаемых решений, определяемых через отношение достигнутого эффекта к затраченным ресурсам (времени, деньгам, усилиям), обеспечивая прирост критерия экономической эффективности на 0,8 о.е. (8,3%), критерия энергетической эффективности $К_{энэ}$ на 0,03 о.е. (4,4%).

3.4 Многофункциональное средство для опрыскивания растений

Предлагаемое средство может быть использовано для внесения жидких средств защиты растений беспилотными летательными аппаратами вертикального взлета и посадки, что соответствует критерию «промышленная применимость». Заявляемая многофункциональная беспилотная летающая система для опрыскивания может быть разборной, т.к. все элементы: основной резервуар для жидкости, проточный электроактиватор, дополнительный резервуар для рабочего раствора и многоканальный распределитель жидкости соединены между собой посредством быстросъемного соединения (рисунок 3.26) [133, 135].



1 – рама; 2 – лучи; 3 – моторы; 4 – несущие винты; 5 – резервуар для жидкости (из эластичного материала); 6 – верхняя пластина; 7 – нижняя пластина; 8 – стойки телескопические с пружинами; 9 – горловина резервуара; 10 – обратный клапан; 11 – форсунки; 12 – электромагнитный клапан на выходном отверстии резервуара; 13 – отрицательно заряженный электрод; 14 – входной патрубок; 15 – выходной патрубок; 16 – положительно заряженный электрод; 17 – контактная группа; 18 – клемма; 19 – клемма; 20 – дополнительный резервуар; 21 – входное отверстие для выходного патрубка 15; 22 – входное отверстие дополнительного резервуара для патрубка 25; 23 – входное отверстие для патрубка 26; 24 – выходное отверстие; 25 – выходной патрубок с дозатором для биостимулятора; 26 – выходной патрубок с дозатором для препарата; 27 – дозатор на патрубке 25 (биостимулирующий препарат); 28 – дозатор для жидкостных добавок на патрубке 26 (пестицид); 29 – блок управления; 30 – энергетическая установка; 31 – дополнительный электромагнитный клапан; 32 –распределитель жидкости; 33 – насос; 34 – трубопроводы.

Рисунок 3.26 - Схема многофункционального средства для опрыскивания растений

Многофункциональная беспилотная летающая система для опрыскивания растений работает следующим образом [134]. Предварительно резервуар 5 заполняют жидкостью – водой, которую подают под давлением через горловину 9 и обратный клапан 10. Поскольку резервуар 5 для жидкости выполнен из эластичного материала, то заполняясь водой он увеличивается в объеме и давит на

пластины 6 и 7, раздвигая их относительно друг друга. При этом происходит растяжение пружин, размещенных в секциях стоек 8. При заполнении резервуара 5 для жидкости обратный клапан 10 предотвращает вытекание жидкости через горловину 9, а стойки 8 в виде телескопических труб за счет внутренних пружин выдвигаются на наибольшую длину. Далее система с заполненным резервуаром 5, начинает перемещаться по заданной траектории к обрабатываемому полю. В этот момент оператор дистанционно через блок управления 29 открывает электромагнитный клапан 12. Вода из резервуара 5 через входной патрубок 14 и проточный электроактиватор поступает в дополнительный резервуар 20, при этом электромагнитный клапан 31 закрыт. Из резервуара 5 вода поступает во внутрь проточного электроактиватора воды в полость отрицательно заряженного электрода 13. Вода является вязкой и обладает внутренним трением, которое препятствует относительному перемещению ее слоев относительно друг друга, т.е. имеет разную скорость. Первый слой потока воды, который взаимодействует с электродом 16, имеет меньшую скорость за счет внутреннего трения об эти лопасти, следующий слой потока воды за счет явления переноса импульса движения имеет большую скорость, и так до центра потока скорости слоев потока увеличиваются, а затем скорости слоев потока начинают уменьшаться. Если линейно аппроксимировать на прямолинейные участки периметр канала (цилиндра), по которому проходит поток воды, то первый слой потока воды ударяется о внешние грани, образуя турбулентное завихрение потока в области внутренних граней. В образованном вращающемся потоке воды под действием центробежных сил он приобретает радиальное движение от центра вращающегося потока к его периферии, стекает по поверхности и выводится через выходной патрубок 15. Таким образом, поток воды при взаимодействии с электродом 16 приобретает вращательное движение, завихряется и его турбулентность возрастает, что обеспечивает увеличение точек контакта молекул воды с электродами и повышение коэффициента полезного действия электроактиватора. В процессе вытекания воды из резервуара 5 пластины 6 и 7 с помощью внутренних пружин стоек 8 сжимают его. Это позволяет обеспечивать силу сжатия пластиной

6 и пластиной 7 резервуара 5 и, как следствие, одинаковое давление на воду, как при заполненном резервуаре 5, так и в последующем по мере уменьшения воды в нем до полного его опорожнения. Во время заполнения дополнительного резервуара 20 за счет дистанционного управления блок управления 29 открывает один из дозаторов и определенное количество жидкостной добавки поступает в дополнительный резервуар 20. Затем оператор подает сигнал на блок управления и электромагнитный клапан 12 закрывается, а электромагнитный клапан 31 открывается и рабочий раствор поступает через многоканальный распределитель жидкости 31 в форсунки 11 с необходимым давлением, создаваемым насосом 32. После обработки растений беспилотная летающая система возвращается к месту для очередной заправки. При использовании заявляемого предложения возможны режимы работы: обработка католитом с добавлением ростстимулирующего препарата, для стимулирования роста и развития растений; обработка анолитом с добавлением пестицида, для уничтожения сорняков, вредителей и болезней. Для стимулирования роста растений используют фракцию воды – католит, имеющей отрицательно заряженный потенциал. Для его получения к клемме 19 через блок управления 29 подводится отрицательный потенциал от энергетической установки, а к клемме 18 – положительный потенциал. Дозатор 27 закрыт и к дополнительному резервуару 20 не поступает биостимулирующий препарат, когда дозатор 27 открывают – через патрубок 25 в дополнительный резервуар 20 поступает биостимулирующий препарат. Система может обрабатывать растения только католитом. В результате катодной обработки вода приобретает щелочную реакцию за счет превращения некоторой части растворенных солей в гидроксиды, при этом католит имеет уровень кислотности в пределах от 8,5 до 10,5 pH. Окислительно–восстановительный потенциал (ОВП) воды повышается, уменьшается поверхностное натяжение, снижается содержание растворенных кислорода, азота, возрастает концентрация водорода, свободных гидроксильных групп, уменьшается электропроводность, изменяется структура не только гидратных оболочек ионов, но и свободного объема воды. В результате образования растворимых гидроксидов натрия и калия, повышения вследствие этого водородного показателя pH

происходит сдвиг углекислотного равновесия. В электроактивированном растворе образуются суперактивные метастабильные соединения с высокой восстановительной способностью, которые значительно усиливают проявление щелочных и восстановительных свойств католита. При взаимодействии католита с листостебельной частью растений повышается их биологическая активность и урожайность. При этом повышается окислительно–восстановительный потенциал (ОВП) воды, который может быть доведен до 950 мВ, а водородный показатель до 10,9. Полив католитом оказывает влияние не только на продуктивность, но и на биохимический состав растений – снижается содержание протеина, клетчатки, сахаров и влаги, повышается содержание сухого вещества. Это явление проявляется счет снижения поверхностного натяжения католита, в результате которого связи между молекулами воды ослабевают и растениям легче ее усваивать. Для обработки пестицидами используют анолит, имеющий положительно заряженный потенциал. Для его получения к клемме 19 через блок управления подводится положительный потенциал от энергетической установки, а к клемме 18 – отрицательный потенциал. Дозатор 28 закрыт и к дополнительному резервуару 20 не поступает гербицид, дозатор 28 открывают и через патрубок 26 в дополнительный резервуар 20 поступает гербицид. При этом поток воды обтекает поверхность внутреннего электрода 16, что приводит к повышению ее биологической активности. В то же время положительный электрический потенциал от внутреннего электрода передается потоку воды, которая приобретает положительный ОВП. При этом уменьшается величина водородного показателя pH. Вода с положительным окислительно–восстановительным потенциалом и пониженным pH от 2,5 до 7, имеет сильные бактерицидные свойства, обеспечивающие уничтожение сорняков и вредителей. Таким образом, заявляемое техническое средство позволяет осуществить эффективную обработку растений в труднодоступных местах в нескольких режимах в реальном времени, подтверждая свою многофункциональность.

На основе анализа математической модели электроактиватора и зависимости режимных и конструктивных параметров, для уменьшения

трудоемкости при решении инженерной задачи построения конструкции электроактиватора для источников воды с различным минеральным составом и получения необходимого объема раствора, возможно произвести упрощенный расчет по номограмме (рисунок 3.27–3.29) [77, 84].

Данная номограмма позволяет определить ток для необходимого обессоливания раствора при различной производительности установки и графически определить уровень кислотности при заданном режиме работы. Существенным достоинством данного метода является возможность определения эффективного диапазона воздействия силы тока при нужной степени обессоливания. Данное достоинство позволит графически определить границы режима управления силой тока при приближении показателя степени минерализации к нулю и избежать превышения затрат электроэнергии и увеличению коэффициента газонаполнения [115].

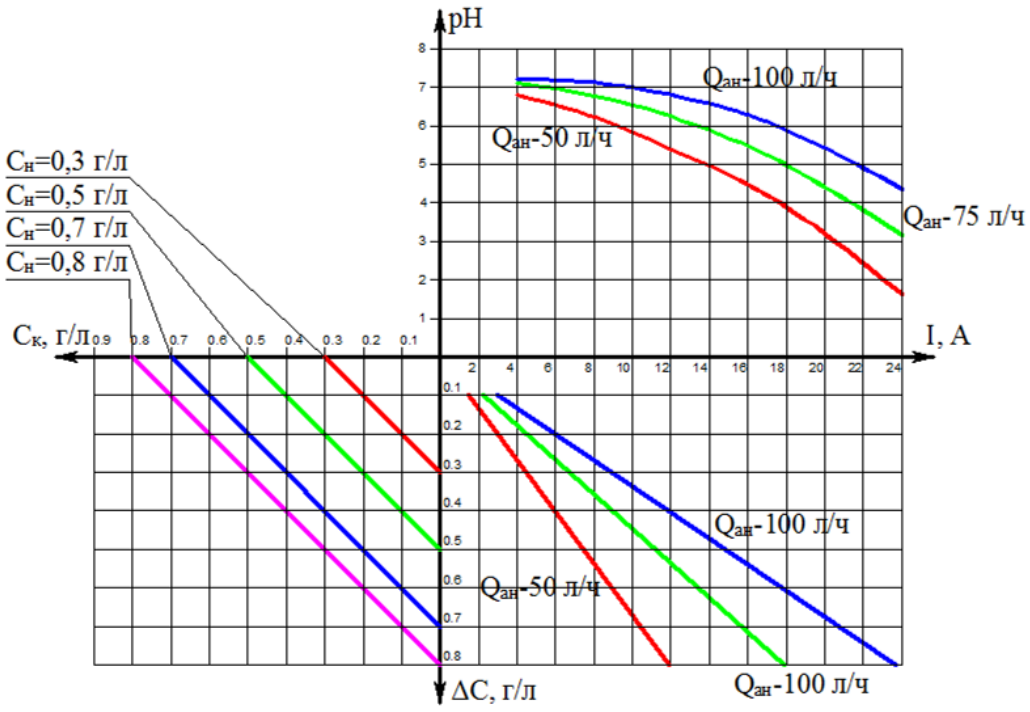


Рисунок 3.27 - Номограмма зависимости pH раствора от тока и конечной минерализации при различной производительности и начальной минерализации

Номограмма (рисунок 3.25) позволяет определить температуру раствора на выходе из камеры при различной электропроводимости и конечной минерализации и известной температуре исходной воды. Также график позволяет убедиться в

возможности регулирования температуры меняя коэффициент производительности *d*.

Для получения энергетических характеристик согласно математической модели построена номограмма (рисунок 3.26). Исходя из полученной электропроводимости, при известном токе задав геометрические размеры канала протекания раствора через конструктивный параметр $К_к$ возможно определить сопротивление камеры, что в свою очередь, позволяет найти величину мощности на камере. При заданной производительности далее возможно графически определить затраты электроэнергии для производства 1 литра раствора [77, 129, 140].

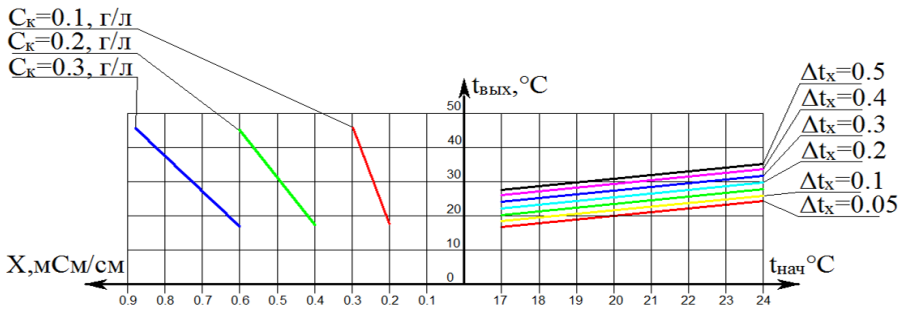


Рисунок 3.28 - Номограмма зависимости электропроводности от начальной температуры и температуры электролита на выходе из камеры при различных коэффициентах смещения температуры и конечной минерализации

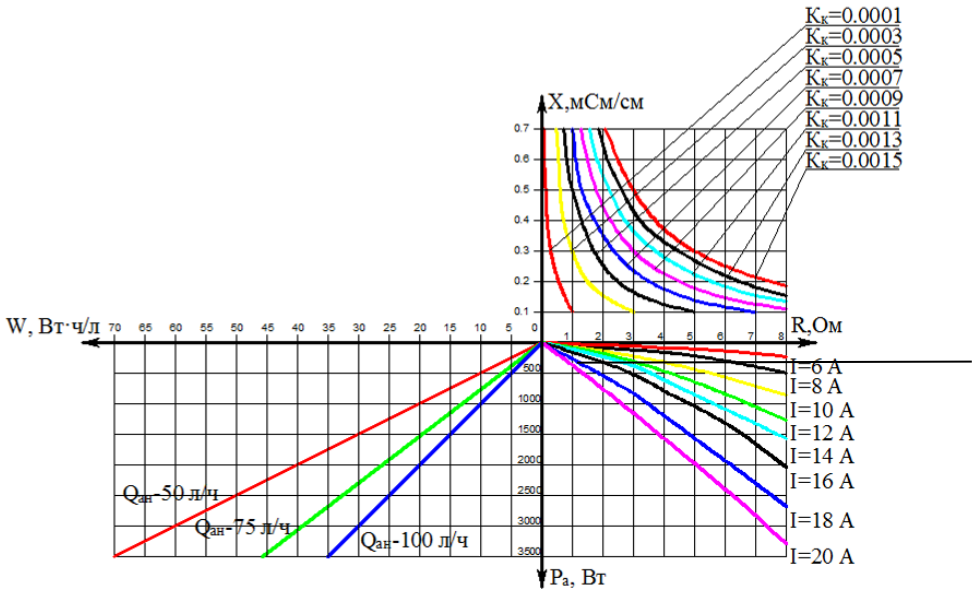


Рисунок 3.29 - Номограмма зависимости электропроводности, сопротивления и расхода электроэнергии при различной силе тока, конструктивном параметре и производительности

Методика работы с номограммой следующая:

1. Необходимо определить тип используемого препарата. В зависимости от выбора препарата установить соответствующие требования к качеству воды на выходе из камеры анолита.

2. Определяется необходимый объем рабочего раствора, задается время обработки и производительность активатора.

3. Определить параметры воды из источника, который будет использоваться для приготовления рабочего состава: водородный показатель, минеральный состав (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, SO_4^{2-}, HCO_3^{-},Cl^{-}), электропроводность, температура. Данный анализ может быть произведен химической лабораторией, либо самостоятельно с помощью лабораторных приборов.

4. Определить коэффициент концентрирования $К_с$.

5. По номограмме при заданной производительности определяется сила тока, необходимая для достижения нужных параметров и далее переходя по номограмме определяется уровень водородного показателя при заданном режиме.

6. Следует определить температуру раствора на выходе из камеры и электропроводность раствора.

7. По номограмме определяются энергетические параметры: сопротивление анодной и катодной камер, мощность и удельные затраты электроэнергии.

По разработанной математической модели и номограмме рассчитаны конструктивные и параметры, и режим работы электроактиватора для воды с конкретными начальными показателями [132].

Расчёт потребного объёма рабочего раствора:

$$V_{\text{общ}} = S \cdot Q = 130 \text{ га} \times 10 \text{ л/га} = 1300 \text{ л}$$

Если обработка планируется за одну смену (8 ч работы БАС с учётом заправок), то требуемая производительность электроактиватора равна:

$$Q_{\text{акт}} = \frac{1300}{8} \approx 163 \text{ л/ч}$$

Принимаем с запасом 170 л/ч по анолиту.

Коэффициент концентрирования равен:

$$K_c = \frac{C_{\text{исх}}}{C_{\text{треб}}} = \frac{600}{200} = 3{,}0$$

Используем адаптированное выражение из методики для расчёта тока электроактиватора:

$$I = \frac{F \cdot (C_{\text{исх}} - C_{\text{треб}}) \cdot Q_{\text{ан}}}{n \cdot \eta} = \frac{96485 \cdot 0{,}4 \cdot 4{,}72 \times 10^{-5}}{2 \cdot 0{,}8} \approx 1{,}14 \text{ А}$$

Это минимальный ток для обессоливания. На практике требуется больше для коррекции pH.

Критический ток газообразования равен:

$$I_{\text{крит}} = 0{,}1 \cdot Q_{\text{ан}} \cdot C_{\text{исх}} = 0{,}1 \cdot 170 \cdot 600 = 10{,}2 \text{ А}$$

Рабочий ток следует выбирать в диапазоне 6–9 А.

Удельное сопротивление воды после активации:

$$\rho_{\text{уд}} \approx 500 \text{ Ом} \cdot \text{см} = 5 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

Сопротивление камеры (геометрические размеры: L = 1,27 м, S = 0,03 × 0,004 = 1,2e–4 м²) равно:

$$R = \rho_{\text{уд}} \cdot \frac{L}{S} = 5 \cdot \frac{1{,}27}{1{,}2 \cdot 10^{-4}} \approx 52917 \text{ Ом}$$

Напряжение равно:

$$U = I \cdot R = 9 \cdot 52917 \approx 476 \text{ В}$$

Мощность активатора будет равна:

$$P = I \cdot U = 9 \cdot 476 \approx 4{,}28 \text{ кВт}$$

Энергозатраты на 1 м³ анолита составят:

$$W = \frac{P}{Q_{\text{ан}}} = \frac{4{,}28}{0{,}17} \approx 25{,}2 \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3$$

На весь объём обработки (принимаем 1300 л на смену) энергозатраты составят:

$$E_{\text{общ}} = 25{,}2 \cdot 1{,}3 \approx 32{,}8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

В процессе электроактивации получаем дополнительный положительный эффект в виде нагрева раствора.

$$\Delta t = \frac{P \cdot \eta_{\text{н}}}{Q \cdot \rho \cdot c} = \frac{4300 \cdot 0{,}95}{4{,}72 \times 10^{-5} \cdot 1000 \cdot 4190} \approx 20{,}6 \text{ °C}$$

Можно сделать следующий практический вывод, при температуре воды из скважины $t_{\text{н}} = 10$ С, температура воды в процессе активации поднимется до $t_{\text{а}} \approx 20{,}6$ С – в пределах нормы (рекомендовано не более 25 °С для хорошей растворимости и сохранения свойств препарата). Для снижения нагрева можно увеличить производительность или уменьшить ток.

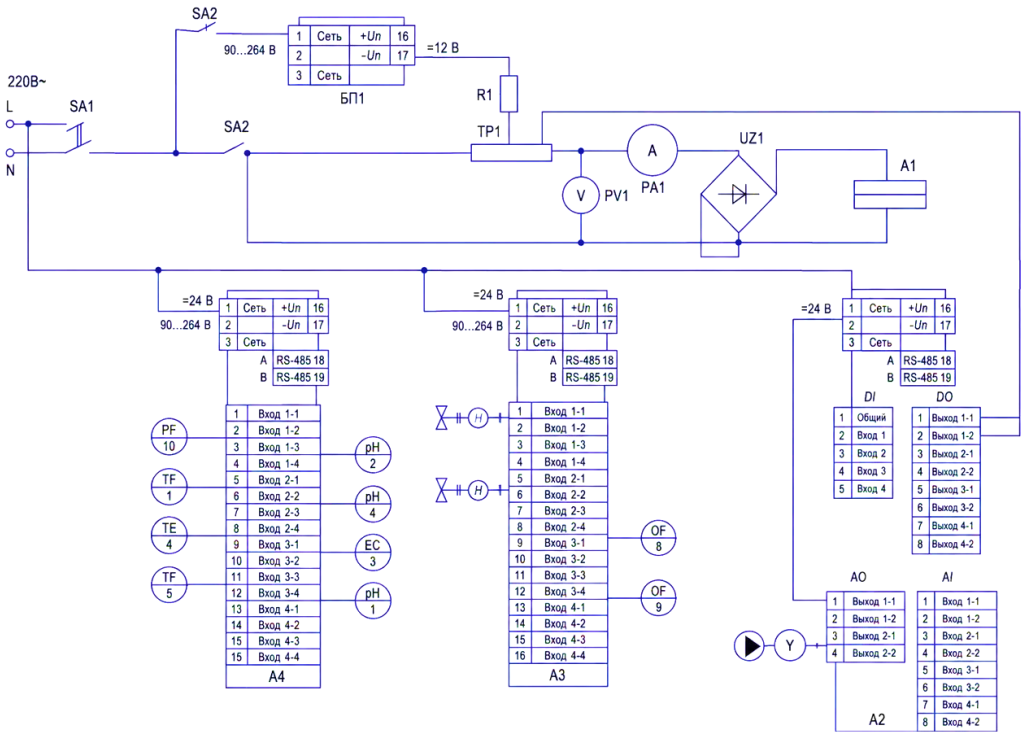
При возможности подготовки рабочего раствора заранее параметры электроактиватора могут быть изменены с меньшим энергопотреблением (таблица 3.10).

Таблица 3.10 - Сравнительная таблица режима работы электроактиватора при разной производительности

Параметр	Исходный расчет	Новый расчет
Производительность $Q_{\text{акт}}$	170 л/ч	85 л/ч
Ток I	9 А	4,5 А
Напряжение U	~480 В	~238 В
Мощность P	4,3 кВт	1,07 кВт
Нагрев воды Δt	20,6 °С	10,3 °С
Энергозатраты$E_{\text{общ}}$	32,8 кВт·ч	16,4 кВт·ч
Затраты на электроэнергию (6 руб./кВт·ч)	197 руб	98 руб
Температура на выходе	~30,6 °С	~20,3 °С
Газообразование	Умеренное	Минимальное
Время работы на 1300 л	7,65 ч	15,3 ч

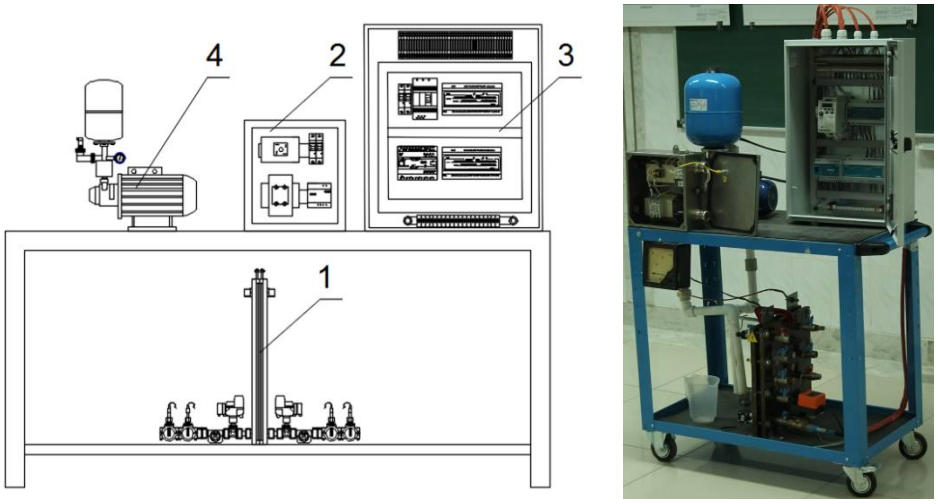
По расчетным значениям разработана схема стенда для электроактивации и собрана лабораторная установка (рисунки 3.30 и 3.31).

Регулировать и отслеживать за работой установки возможно через ПК либо панель оператора. Кроме того, предложенная система позволит сохранять данные о изменении параметров в системе, строить графики изменения параметров, учитывать аварийный режим работы и выводить сообщение о приближении режима к критическому.



SA – коммутационные аппараты; pH, EC, TE, PE – датчики pH, электропроводности, температуры и давления; A1 – электроактиватор; A2 – ПЛК; A3 – МДВВ; A4 – МВА; QF – расходомеры; БП1 – блок питания; KA1 – твердотельное реле; PA1 и PV1 – амперметр и вольтметр; UZ1 – преобразователь; R1 – регулировочный реостат.

Рисунок 3.30 - Электрическая принципиальная схема управления электроактиватором



а) б)

1 – электроактиватор; 2 – щит силовой; 3 – щит автоматизированного управления; 4 – электрический насос

Рисунок 3.31 - Лабораторный стенд электроактиватора: а) – схема установки; б) – внешний вид лабораторной установки

Повышение биологической эффективности обработок СЗР за счет ЭХАВ-растворов и улучшенного осаждения дает рост урожайности до 5%, что обеспечивает прирост коэффициента рентабельности инвестиций $K_{\text{рент}}$ на 0,4 о.е. Снижение нормы расхода жидкости до 80% увеличивает коэффициент экономии водного ресурса $K_{\text{водрес}}$ на 0,3 о.е. Снижение пестицидной нагрузки за счет лучшей растворимости препарата на 25% повышает коэффициент экологической эффективности $K_{\text{экол}}$ на 0,15 о.е. Общий прирост критерия экономической эффективности $К_{экэ}$ может составить 0,85 о.е. (10,2%). Увеличение энергозатрат на приготовление раствора (энергозатраты на электроактивацию) компенсируются снижением транспортных расходов ($E_{\text{трансп}}$) на перевозку воды (до 30%) по сравнению с традиционной технологией и снижением удельных энергозатрат БПЛА $E_{\text{удБПЛА}}$ на 10-15% за счет снижения массы полезной нагрузки (уменьшается тяга) после корректировки полетного задания и улучшенного осаждения. Общий баланс – снижение совокупных энергозатрат БАС $E_{\text{совБАС}}$ на 5%, что дает прирост критерия энергетической эффективности $К_{энэ}$ на 0,04 (5,4%).

3.5 Внедрение результатов исследования в образовательную деятельность в соответствии с национальными проектами

Представленные способы и средства нашли практическое применение не только в производственной сфере, но и в системе профессиональной подготовки кадров для агропромышленного комплекса и беспилотной авиации. Разработанные алгоритмы, программные продукты и инженерные методики были интегрированы в учебные материалы и образовательные программы различных уровней, что подтверждает их методическую состоятельность и практическую значимость [Прложение ……].

Исследование выполнялось в рамках НИР Кубанского государственного аграрного университета на 2021–2025 гг. по теме № 32 (номер госрегистрации 121031700099-1), государственных заданий Министерства сельского хозяйства РФ

на 2019–2022 гг. по темам, посвященным прогнозированию и мониторингу научно-технологического развития АПК, продукционному анализу технологий точного сельского хозяйства, автоматизации и роботизации (номера госрегистрации АААА-А20-120012190090-9, АААА-А20-120012890063-6, 122032300494-4 НИОКТР, 122031400635-3 НИОКТР), а также при поддержке гранта Кубанского научного фонда МФИ-П-20.1-45/20, гранта Президента Российской Федерации по адаптации технологий БАС 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. Финансовая и организационная поддержка на всех этапах разработки и внедрения позволила обеспечить непрерывность исследовательского цикла от теоретической проработки до практической апробации (Приложение Д).

В период с 2020 по 2026 гг. разработанные автором алгоритмы обработки изображений, построения ортофотопланов, сегментации областей и распознавания растений, а также методологический справочник и инженерный калькулятор для расчета полетных заданий 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», а также в процессе подготовки учителей агротехнологических классов, что способствует распространению компетенций в области цифрового земледелия среди педагогического сообщества.

Компетенции полученные в ходе проведения научного исследования применялись при разработке программного комплекса Drone simulator UAVPROF: Фермерское хозяйство (ООО «Школа беспилотной авиации», ООО «Стратус»). Данный симулятор, включенный в реестр отечественного программного обеспечения (№ 20270 от 27.11.2023), представляет собой специализированный тренажер для обучения операторов БПЛА. В его состав вошли отраслевые и прикладные задания, применимые в сельском хозяйстве, в том числе возможность работы с открытым исходным кодом и ПО, эмулирующим наземную станцию управления – QGroundControl. Симулятор позволяет отрабатывать полный цикл сельскохозяйственных работ: от мониторинга полей и настройки полетного задания до точного внесения средств защиты растений и удобрений по заданному маршруту. Благодаря использованию встроенных прошивок реальных автопилотов, точной настройке физики полета, эмуляции поведения различных типов беспилотных воздушных судов и возможности подгрузки цифровых 3D-моделей рельефа, тренажер обеспечивает высокий уровень подготовки операторов, приближенный к реальным производственным условиям.

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». Это обеспечивает междисциплинарный подход к обучению и формирование у студентов комплексного представления о возможностях применения беспилотных авиационных систем в различных отраслях экономики.

Общий объем привлеченных средств от реализации образовательных программ с использованием разработанных автором материалов составил 2 230 тыс. руб., а число обученных специалистов превысило 300 человек. Данные показатели свидетельствуют о востребованности предложенных решений, их

практической применимости и экономической эффективности в сфере подготовки кадров для быстроразвивающегося рынка беспилотных авиационных систем и цифрового сельского хозяйства. Масштаб внедрения подтверждает, что разработанные алгоритмы, программные продукты и инженерные методики не только решают актуальные производственные задачи, но и формируют современную образовательную среду, способствующую подготовке квалифицированных кадров, владеющих передовыми цифровыми технологиями.

3.6 Выводы по главе

1. Предложен алгоритм и программное обеспечения для обработки изображений и построения ортофотоплана, которые включают инструменты для обработки геометрии карты и поддерживают экспорт в различные форматы файлов. Внедрение предложенного ПО снижает затраты на оплату труда персонала за счёт уменьшения потребности в высококвалифицированных аналитиках или перераспределения их времени, за счет этого увеличиваются коэффициенты: рентабельности инвестиций на 0,6, устойчивости при погашении долга при внедрении БАС на 0,15, и коэффициент производительности работ по мониторингу на 0,2. Общий прирост коэффициента экономической эффективности может составить 0,95 (13,8%). Сокращение времени обработки данных в 2 раза снижает энергетические затраты персонала и энергозатраты на серверную обработку данных на 30%, обеспечивая тем самым прирост коэффициента энергетической эффективности на 0,05 (5,8%). Внедрение описанного ПО позволяет повысить лояльность агрономических служб к технологиям точного земледелия.

2. Предложен алгоритм работы и программное обеспечение по сегментации областей изображений и распознавания для оценки качества всходов на основе методов анализа текстур и теории графов, которые позволяют выделять области с аномалиями (например, очаги сорной растительности) и оценивать их динамику во времени (Свидетельство регистрации программы для ЭВМ №2026618410).

Снижение расхода препаратов при очаговых обработках до 30% повышает коэффициент экономии водного ресурса на 0,4. Автоматический подсчет растений увеличивает коэффициент производительности мониторинга $K_{\text{пром}}$ на 0,15. Суммарное влияние на коэффициент экономической эффективности - 1,25 (15,0%). С точки зрения энергетических затрат снижение потребности в вычислительных мощностях и времени на анализ дает прирост коэффициента энергетической эффективности на 0,07 (8,1%).

3. Разработано программное обеспечение на базе методологического справочника и инженерного калькулятора для расчета параметров полетного задания для БАС в различных технологических операциях. Внедрении данного ПО на производстве повлечет за собой увеличение инвестиции в части затрат на ПО (50 000 руб.) и обучение (10 000 руб.), увеличатся показатели удельное энергопотребление персонала и инфраструктуры (на 13% и 7% соответственно). Этот рост будет скомпенсирован перераспределением трудовых обязанностей с соответствующим снижем затрат на оплату труда и повышением эффективности принимаемых решений, определяемых через отношение достигнутого эффекта к затраченным ресурсам (времени, деньгам, усилиям), обеспечивая прирост коэффициента экономической эффективности на 0,8 (8,3%), энергетической эффективности на 0,03 (4,4%).

4. Разработанная многофункциональная беспилотная летающая система для опрыскивания растений, защищенная патентом (Патенты 2789929, 2793489, 2688183, 2644472). Разработаны и изготовлены лабораторный стенд и блок управления электроактиватором, позволяющие по заданным начальным параметрам воды установить режим работы 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% (Патенты 2634277, 2777466, 2643839). 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 коэффициента экономической эффективности в результате внедрения электротехнологии может составить 0,85 (10,2%). Установлено снижение совокупных энергозатрат БАС на 5%, что дает прирост коэффициента энергетической эффективности на 0,04 (5,4%).

5. Наибольший вклад в рост коэффициентов экономической и энергетической эффективности вносит ПО для сегментации и распознавания изображений (15,0% и 8,1% соответственно), так как оно напрямую влияет на прирост урожайности и экономию препаратов и за счет снижения вычислительных мощностей и времени анализа. Инженерный калькулятор дает наименьший прирост среди решений (2,2 % и 3,8% соответственно), но его роль ключевая, обеспечивая системную оптимизацию всех остальных решений и переводя методологию из ручной в автоматизированную. Опрыскивание с электротехнологиями обеспечивает экономический и экологический эффекты, а энергозатраты на активацию практически полностью компенсируются снижением транспортных расходов и массы нагрузки при УМО. Применение предложенных способов и средств дает общий прирост коэффициента экономической эффективности до 46,3%, что подтверждает высокую экономическую эффективность предлагаемого комплекса решений. Все решения окупаются менее чем за один сезон, это делает их инвестиционно-привлекательными для сельскохозяйственных предприятий. Общий прирост коэффициента энергетической эффективности составил 21,9%, что означает переход технологии в разряд энергосберегающих технологий.

6. Разработанные в диссертации программно-аппаратные решения не только решают актуальные финансово-экономические задачи (в Кубанском ГАУ привлечено 2 230 тыс. руб.), но и формируют современную образовательную среду, способствуя подготовке квалифицированных кадров (в Кубанском ГАУ более 300 специалистов), владеющих передовыми цифровыми технологиями, что соответствует целям национального проекта «Беспилотные авиационные системы», федерального проекта «Кадры для беспилотных авиационных систем».

4. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕНИЯ ПОЛЕВЫХ ОПЫТОВ

4.1 Результаты внедрения технологии мониторинга озимой пшеницы с помощью БАС

В полевом эксперименте исследуется возможность мониторинга озимой пшеницы в разные периоды с разными камерами. Целью полевого опыта является определение параметров съемки для различных фаз вегетации озимой пшеницы. На основе комплекса полученных ранее математических уравнений, включающих расчет параметров аэрофотосъемки, метеорологических факторов и параметров БПЛА, произведена оценка экономической и энергетической эффективности применяемых аппаратов. В качестве БАС применяемых в эксперименте использовались следующие: DJI Phantom 4 (P4 RGB, с RGB–камерой) и DJI Phantom 4 Multispectral (P4M, с 6–ти канальной мультиспектральной камерой). Емкость АКБ 5350 мАч. Исследование проводилось на поле площадью 100 га, с визуально ровным рельефом и ровными краями. Три стороны ограничены лесополосами, одна асфальтированной дорогой. Ориентация поля с севера на юг, место расположения – учхоз «Краснодарское» Кубанского ГАУ, преобладающие ветра в данной местности – восточные, и северо–восточные. Параллельно со сбором данных с БАС производилось дистанционное зондирование по спутниковым данным соответствующим ПО. Учет урожайности осуществлялся бортовым квантиметром, входящим в штатную систему картирования урожайности Claas Telematics.

Мониторинг осуществлялся в два периода с разными погодными условиями и периодами вегетации: 28 февраля 2019 г. (ранняя весна, после схода снега) и 9 апреля 2019 г. (активная вегетация). Для пшеницы в фазе «Всходы» (февраль–март) и «Кущение» (апрель) оптимальный теоретический GSD составляет 1–3 см/px, примем среднее значение 2,5 см/px. P4 RGB имеет на борту штатную камеру с фокусным расстоянием 8,8 мм и размером пикселя 2,4 мкм. Для указанного GSD расчетная высота составляет 84 м, примем 85 м, размер снимка

121,6х91,2 м (расчетная скорость ветра на высоте – 7,8 м/с, удовлетворяет условиям для данных моделей, не более 20 м/с), при этом продольные/поперечные перекрытия приняты 60/70, количество проходов – 17, количество кадров – 816 шт, продолжительность полета – 48 мин, расстояние – 28,7 км.

У БАС P4M мультиспектральная камера имеет другие характеристики: матрица 1/2.9" CMOS, фокусное расстояние 5,74 мм. Для нее GSD будет хуже при той же высоте (примерно 5,0 см/px), требуется уменьшение высоты полета, расчетное значение составило – 30 м (2,5 см/px), размер снимка 40х30 м, при этом снижается скорость полета до 5 м/с, так как минимально допустимый интервал переключения камеры для данной модели – 3 с. Перекрытия приняты 60/70, количество проходов – 49, количество кадров – 6960 шт, продолжительность полета – 274 мин, расстояние – 82,2 км.

При съёмке 28 февраля были следующие метрологические условия: ветер 3–7 м/с (В), температура до –5°С. Холодный воздух плотнее, это увеличивает энергозатраты БАС на создание тяги. Сильный ветер (в порывах до 7 м/с) требует дополнительных затрат электроэнергии, так как для его компенсации потребуются дополнительные управляющие моменты и изменится баланс сил в горизонтальном полете ($P_{\text{сопр}}$). Это приведет к росту потребляемой мощности ($P_{\text{потр}}$). Показатель шероховатости подстилающей поверхности для фазы развития в этот период примем z_0=0,03 м. Профиль ветра у поверхности земли будет носить логарифмический характер. Расчетная скорость полета 8-10 м/с для P4 RGB и 5-6 м/с для P4M.

На момент съемки 9 апреля скорость ветра составила 2–5 м/с (З), температура +18…+23°С. Воздух теплый, менее плотный. В этот период пшеница в фазе кущения (высота культуры 20–30 см), шероховатость поверхности z_0 возрастает до 0,035 м. Профиль ветра изменится, в слое растительности скорость будет быстро затухать, это стоит учитывать при опрыскивании – критически важно для осаждения капель. Направление галсов перпендикулярно ветру (С–Ю), это минимизирует влияние бокового ветра и снижает энергозатраты при противодействии сноса. Расчетная скорость полета увеличивается до 10–12 м/с для

P4 RGB, для P4M осталась той же из-за технических ограничений камеры. Скорость взлета и посадки для всех опытов была одинаковой – 5 м/с.

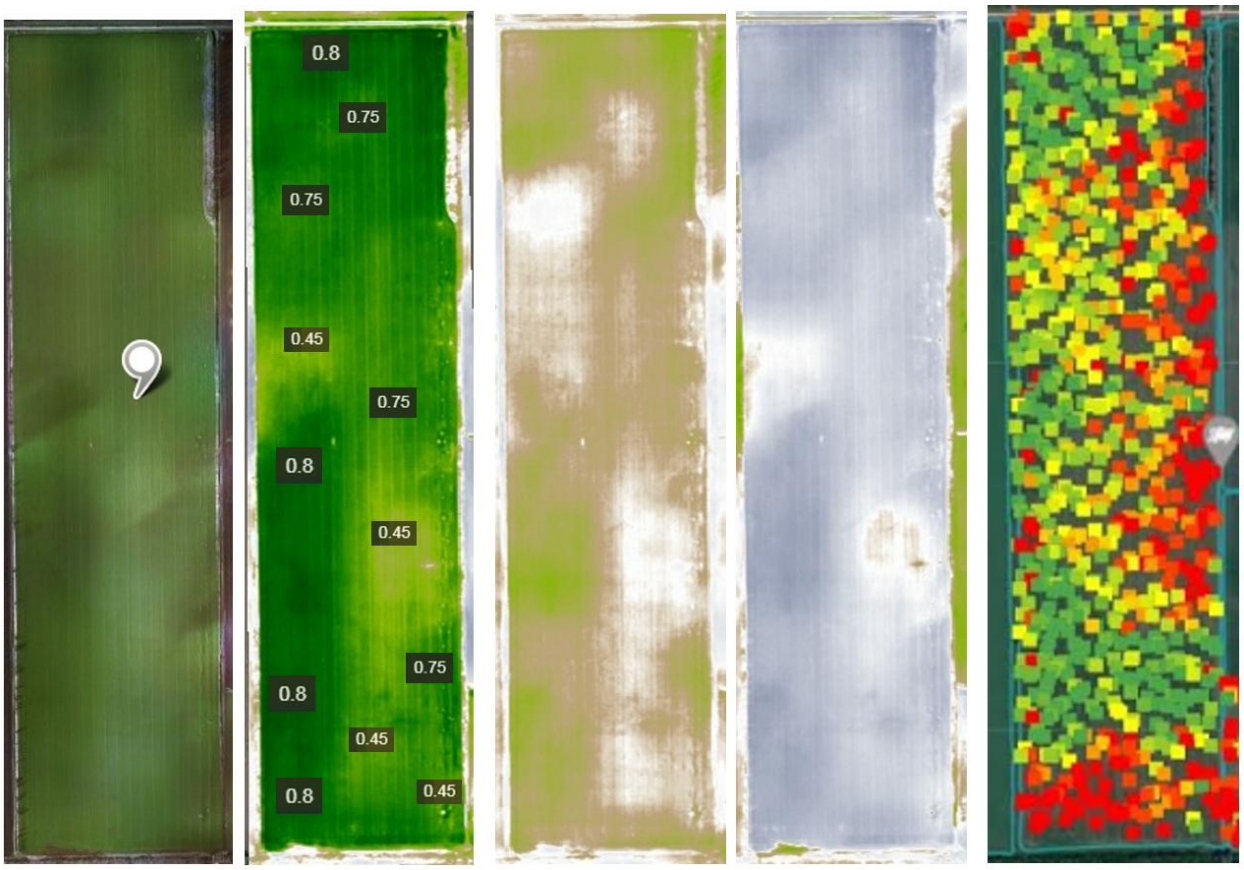
Были определены рациональные параметры полетных заданий для двух дней мониторинга и для разных БАС, приведены в таблице 4.1. Расчет энергетических затрат выполнен с допущением, что в каждом полете энергия АКБ расходуется на 100%. На практике же при типах АКБ используемых на исследуемых БАС оставляют резерв 25-30% заряда для безопасной посадки и сохранения работоспособности АКБ.

Таблица 4.1 - Параметры съемки для БАС DJI Phantom 4 и DJI Phantom 4 Multispectral

Параметр	P4 RGB (28.02)	P4 RGB (09.04)	P4M (28.02)	P4M (09.04)
Высота, м	85	85	30	30
GSD, см/px	2,5	2,5	2,5	2,5
l_x, м	121,6	121,6	40	40
l_y, м	91,2	91,2	30	30
Количество маршрутов (N_M), шт	17	17	49	49
Снимков на маршрут (N_{CH}), шт	48	48	142	142
Всего снимков ($N_{\text{уч}}$), шт	816	618	6960	6960
Объем данных, ГБ	4,08	4,08	34,8	34,8
Скорость, м/с	10	12	5	5
Время, мин	48	40	274	274
Количество заменяемых АКБ, шт	4	3	17	17
Энергетические затраты, МДж	1,17	0,88	4,98	4,98

Анализируя данные, представленные в таблице 4.1 можно сделать выводы, что учет фактора погодных условий (период съемки) и шероховатости подстилающей поверхности носит реальный практический смысл, и их стоит учитывать при определение энергетических затрат. Для задач мониторинга посевов (NDVI, вегетационные индексы) P4M необходим, но его энергоэффективность крайне низка на больших полях, рекомендуется его использование только для проблемных зон, а не для сплошного мониторинга. Если для задач агронома достаточно RGB-снимков (визуальная оценка всходов и кущения), то БАС с RGB-камерой является безальтернативным с точки зрения расхода электроэнергии.

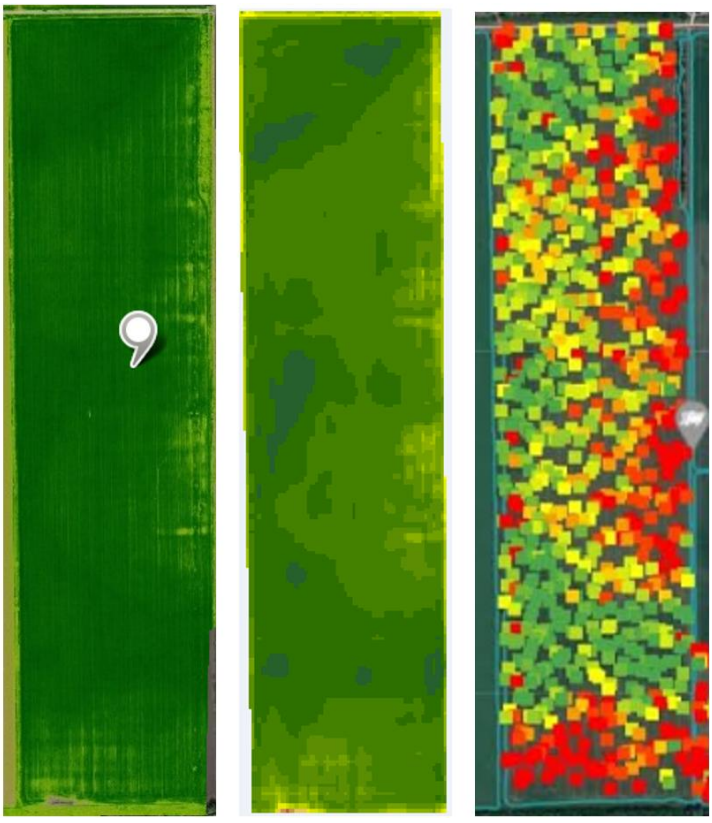
В результате мониторинга двумя БАС получены ЦМР, ортофотоплан, карта индекса NDVI, карта содержания азота, карта содержания влаги в почве, дополнительно представлена карта урожайности (из системы Claas Telematics (рисунок 4.1). По полученным картам видны участки зон неоднородности развития растения, с помощью функции сегментации изображения определены их площади. Понимание соотношения площадей зон неоднородности важно для технологии дифференцированного внесения удобрений, для определения стратегии внесения, количества удобрений и построения карты-задания для наземной или беспилотной техники. Можно выделить три характерные зоны (NDVI = 0,45; NDVI = 0,75; NDVI = 0,8), для которых будут применятся разные нормы внесения удобрений. Так же в дальнейшем отслеживается динамика изменений состояния растений, и полученная карта может быть использована для внесения СЗР с БАС.



а) б) в) г) д)

Рисунок 4.1 - Результаты мониторинга опытного поля: а) – ортофотоплан; б) – индекс NDVI; в) – содержание азота; г) – содержание влаги в почве; д) карта из системы картирования урожайности

Производилось сравнение снимков, полученных с помощью БАС и данных космического мониторинга в системе One Soil (рисунок 4.2), результат показывает высокую сходимость, что подтверждает корректность данных, полученных с БАС. Следует отметить несколько особенностей, связанных с использованием NDVI для построения карт-заданий: погрешность определения NDVI вызванную неравномерностью освещения разных точек поля из-за облачности; низкую информативность NDVI при высоких показателях индекса проективного покрытия (когда листва почти полностью покрывает слой почвы); низкое пространственное разрешение мультиспектральных снимков по сравнению с RGB снимками и вследствие этого более высокая стоимость мультиспектральной съемки, и низкая производительность съемки. Более высокая стоимость мультиспектральной аппаратуры по сравнению со стандартными камерами.



а) б) в)

Рисунок 4.2 - Изображение карт полученных БАС, спутником и системой картирования урожайности: а) – ортофотоплан по снимкам БАС; б) – космоснимки; в) – карта из системы картирования урожайности

На всех картах четко видна зона по центру поля с более низкими показателями. Корреляция с урожайностью так же видна, зона с низкими индексами на итоговой карте урожайности показывает худшее значение. Этот вывод также указывает на правильность учета при расчете критерия экономической эффективности дополнительного дохода при использовании БАС. Ранняя диагностика проблемных участков на поле позволяет применить корректирующие агротехнологические мероприятия (дифференцированную подкормку азотного удобрения) и повысить урожайность проблемных зон или применить совсем противоположную стратегию – вообще не вносить удобрения на этот участок, в связи заведомо низкой урожайностью, что приведет к снижению финансовых затрат на приобретение удобрений, ГСМ и заработную плату, так же снизит энергоёмкость процесса возделывания.

Для расчета критерия экономической эффективности приняты следующие значения: урожайность - 65 ц/га; цена зерна - 1 200 руб./ц; стоимость БАС - 150 000 руб. (P4 RGB) и 500 000 руб. (P4M); стоимость ПО - 50 000 руб.; коэффициент загрузки принят низким - 0,18, так как выполняется только мониторинг; заработная плата оператора БАС - 60 000 руб./мес., аналитика данных - 60 000 руб./мес.; ГСМ – 55 руб./л; прирост урожая - 0,08; ставка депозита - 15%, все средства заемные. За базовое значение принята традиционная технология мониторинга – дистанционное зондирование Земли по спутниковым данным. Результаты расчета параметров определяющих $К_{экэ}$ представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Результаты расчета параметров определяющих Кэкэ

Показатель	P4 RGB	P4M	Теоретические значения коэффициентов
Инвестиции I_0, руб.	225 000	575 000	-
$С_{эксп,БАС}$, руб.	38 010	68 343	-
$Д_i$, руб./год	242 440	202 657	-
NPV, руб.	587 695	104 334	-
$K_{рент}$	1,61	0,18	0-3,4
$K_{уст}$	0,8	0,8	0,8-1,25
$K_{водрес}$	-	-	-
$K_{зам}$	0,5	0,5	0,5-0,99
$K_{пром}$	2,66	0,5	0,5-1,5

Показатель	P4 RGB	P4M	Теоретические значения коэффициентов
$K_{пров}$	-	-	-
$K_{экол}$	1,00	1,00	0,7-0,99
$К_{экэ}$	**5,11**	**2,98**	**3,6-11,11**

По результатам расчетов можно сделать выводы: внедрение БАС для мониторинга экономически целесообразно. Для мониторинга предпочтительнее P4 RGB из-за более низкой стоимости оборудования и высокой производительности. Есть резерв для повышения $К_{экэ}$ путем увеличения коэффициента загрузки за счет совмещения применения БАС с другими задачами.

Теоретические и экспериментальные значение удельных энергозатрат и критерия энергетической эффективности приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Теоретические и экспериментальные значение удельных энергозатрат и критерия энергетической эффективности

Энергетические показатели	Теоретические данные	Экспериментальные данные	Расхождение, %	Теоретические данные	Экспериментальные данные	Расхождение, %
	P4 RGB	P4 RGB		P4M	P4M	
$E_{удБПЛА}$, МДж/га	0,012–0,015	0,0146	8,15	0,028–0,042	0,041	3,14
$E_{зу}$, МДж/га	0,040–0,050	0,042	6,67	0,094–0,141	0,142	0,7
$E_{перс}$, МДж/га	1,25	1,3	4,0	3,75	3,5	6,6
$E_{трансп}$, МДж/га	24,2	25,3	4,34	24,2	25,3	4,34
$E_{инфра}$, МДж/га	0,50–0,55	0,48	8,57	0,50–0,55	0,56	6,67
$E_{совБАС}$, МДж/га	26,0–26,1	26,0366	0,05	28,6–28,7	26,443	7,7
$К_{энэ}$	**5,05–5,69**	**4,992**	**7,04**	**5,05–5,69**	**4,916**	**8,45**

Расхождение теоретических и экспериментальных данных не превышает 10%, что подтверждает адекватность разработанной математической модели, возможность использования методики для инженерных расчетов, достоверность полученных экспериментальных данных. Среднее расхождение составило 5,2% для P4 RGB, и 4,8%для P4M. Основное расхождение по количеству полетов связано с влиянием температуры на эффективность работы аккумуляторов и силовой установки. Для повышения точности прогнозирования в летний период в

математическую модель динамики полета необходимо ввести температурный коэффициент разряда АКБ и уточнить зависимость потребляемой мощности от температуры воздуха. Так же в теоретических расчетах стоит обязательно учитывать скорость срабатывания затвора камеры, так как для некоторых мультиспектральных камер при съемке на небольшой высоте необходима остановка БПЛА для фокусировки, в противном случае качество изображений не будет удовлетворять предъявляемым требованиям. Так же стоит отметить, что для анализа возможно применять камеры с меньшим числом каналов (например, для NDVI достаточно только красного и инфракрасного), что приведет к снижению себестоимости и энергетических затрат или применить индекс аналогичный NDVI, но выделенный из RGB изображений штатной камеры БАС. Данное решение существенно увеличит производительность работ по мониторингу и уменьшит стоимость реализации технологии.

4.2 Сравнительные испытания дифференцированного внесения удобрений под озимую пшеницу с использованием карт-заданий

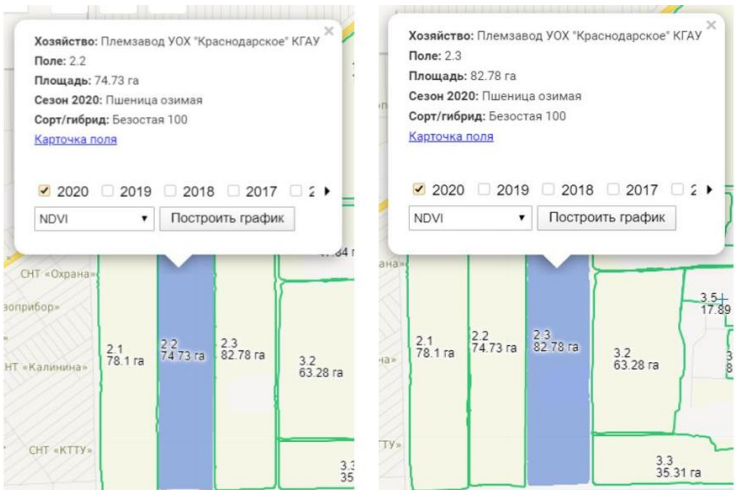
В учхозе «Краснодарское» с 19 февраля по 6 июля 2020 г. проводился эксперимент по сравнительному анализу дифференцированного внесения удобрений. Условия проведения эксперимента следующие: вносимое удобрение – аммиачная селитра. Первая подкормка проводилась в период возобновления весенней вегетации (фазы кущения) 19 февраля 2020 г., вторая – 23 марта 2020 г. (начало выхода в трубку). Для внесения удобрения использовался трактор Claas Axion 850 с разбрасывателем удобрений Amazone ZA TS 4200 (рисунок 4.3). Рабочая скорость движения 19 км/ч, ширина захвата разбрасывателя 28 м. для загрузки карты–задания использовался бортовой компьютер Amatron 3 [37]. На передней части трактора устанавливалась выносная штанга на высоте 1,3 м от уровня земля, вынос по сторонам 2,8 м. На штанге размещались два инфракрасных

оптических сенсора азотного сканера GreenSeeker. Для создания карт–заданий использовалось ПО Farm Works Mobile (компания «Агро–Софт»).



Рисунок 4.3 - Агрегат для дифференцированного внесения удобрений (трактор Claas Axion 850 с разбрасывателем Amazone ZA TS 4200 и азотным сканером GreenSeeker)

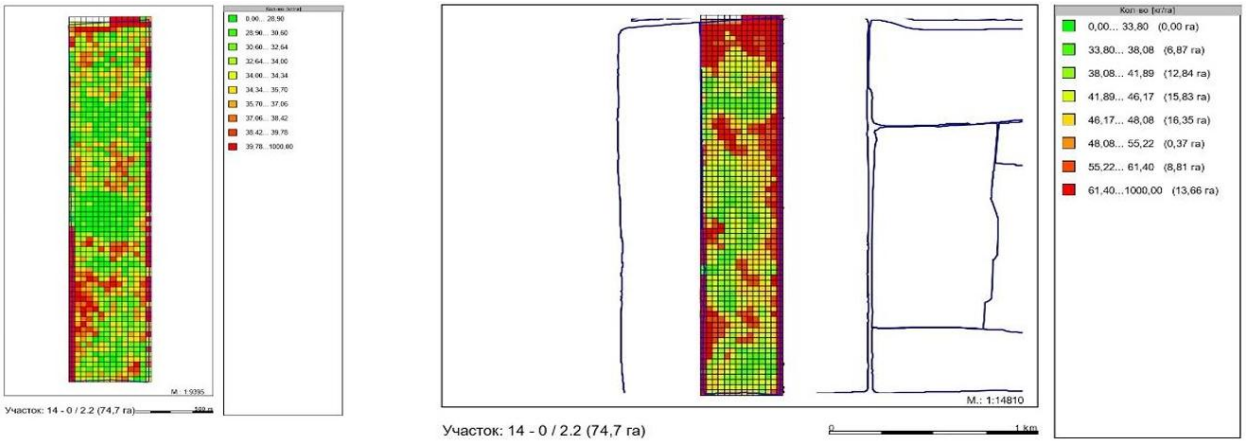
Для исследования выбрано два поля (рисунок 4.4): поле 2.2 (карта–задание дифференцированного внесения удобрений создавалась по космоснимкам) и поле 2.3 (использовался азотный сканер в режиме on–line). Площади полей 74,73 га и 82,78 га соответственно. Культура – пшеница озимая, сорт Безостая 100, дата посева 16 октября 2019 г. Предшественником в обоих случаях была кукуруза на силос.



а) б)

Рисунок 4.4 - Экспериментальные поля: а) - 2.2; б) - 2.3

Определялись нормы внесения удобрения для зон с разной вегетацией. По полю 2.2 (рисунок 4.5): первая подкормка – низкая зона вегетации (значение индекса NDVI 0–0,59) норма внесения удобрений 125 кг/га; средняя (NDVI 0,59–0,74) 75–125 кг/га; высокая (NDVI 0,74–1) 75 кг/га; общая масса вносимого удобрения на поле – 8676 кг; средняя норма внесения удобрений – 105 кг/га. Вторая подкормка – низкая зона вегетации (NDVI 0–0,63) норма внесения удобрений 180 кг/га; средняя (NDVI 0,65) 140 кг/га; высокая (NDVI 0,66–1,00) 100 кг/га, общая масса вносимого удобрения на поле – 9670 кг; средняя норма внесения удобрений – 117 кг/га.



а) б)

Рисунок 4.5 - Карты–задания подкормки для поля 2.2: а) – первой; б) – второй

Анализ развития растений выполнялся с использованием космоснимков в системе КосмосАгро по вегетации растений (индекс NDVI) на основе базовой, аналитической шкал и шкалы распределения NDVI. Сравнивая поля, можно заметить, что после 17.03.2020 г. имеет место лучшее развитие растений поля 2.3 – рисунок 4.6.

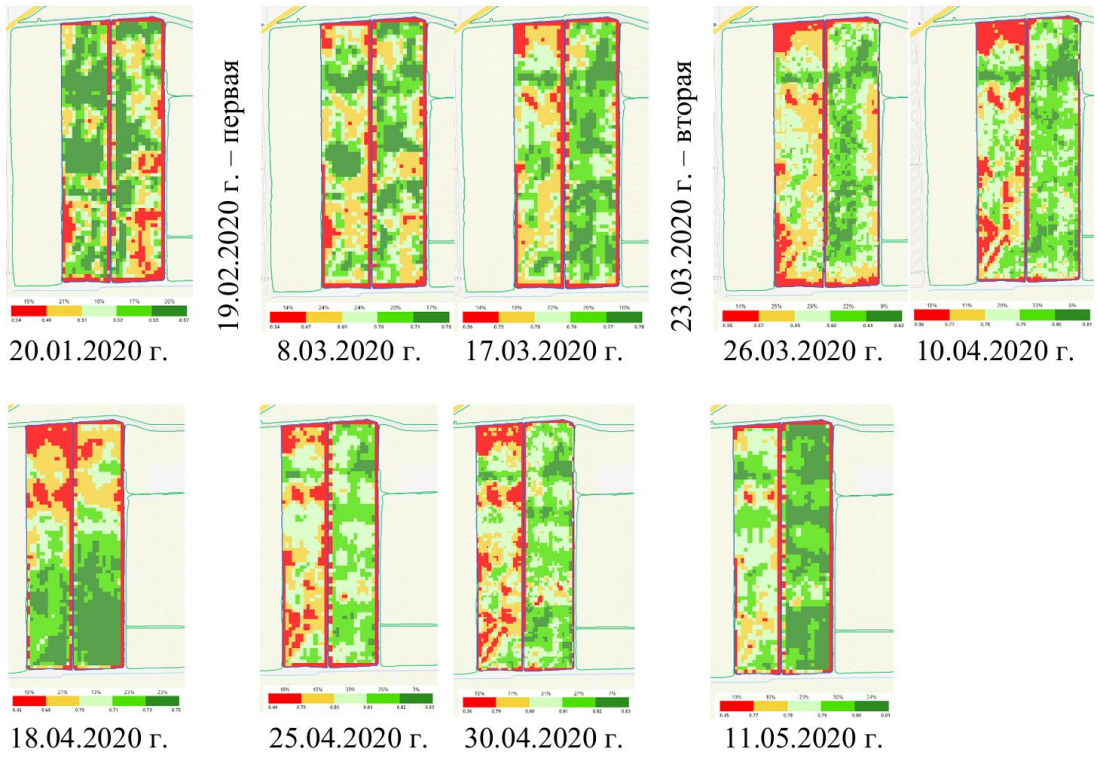


Рисунок 4.6 - Анализ развития растений по космоснимкам (распределение NDVI): слева – поле 2.2, справа – поле 2.3

Перед первой подкормкой на поле 2.2 площадь поля с индексом NDVI = 0,53 составляла 37 %, на поле 2.3 с индексом NDVI = 0,52 – 32 %. Через 18 дней после первой подкормки ситуация не изменилась – наибольший процент выше на поле 2.2. Через 27 дней – ситуация изменилась на поле 2.3 (на 7 % выше). Данная тенденция сохраняется и после второй подкормки. Уборка осуществлялась 5–6 июля 2020 г. комбайнами Tucano 450, 480, 580 с системой Claas Telematics.

Средние значения урожайности, полученные в системе Claas Telematics по полю 2.2 составили 7,03 т/га (фактическая 6,44 т/га), по полю 2.3 – 6,81 т/га (фактическая 6,59 т/га). Усредненные значения по исследуемым полям составили 7 т/га.

Анализ полученных результатов показал, что при использовании азотных сканеров происходит экономия удобрений в среднем на 16 кг/га по сравнению с режимом создания карт–заданий по индексу NDVI на основе спутниковых данных без потери урожайности и качества зерна (содержание клейковины повысилось на 2,3 %; протеина – 0,6 %).

При имеющихся достоинствах сравниваемых в эксперименте технологий они имеют ряд серьёзных ограничений при массовом применении, космоснимки – не всегда возможно получить в нужный период проведения работ, соответственно теряется их актуальность, а азотный сканер GreenSeeker имеет высокую стоимость, и применяется только в узкие промежутки технологических окон, что несомненно негативно отразиться на себестоимости полученной продукции и сроках окупаемости. В качестве альтернативного решения предлагается исследовать метод аналогичный при применении БАС и мультиспектральной камеры, но с выделением индекса NDVI из RGB каналов штатной камеры. Для выделения на полученных снимках пикселей, соответствующих зеленой биомассе, использовалось ПО компании ООО «АиС». На основе предварительного обучения по размеченным снимкам различных зеленых листьев в ПО формируется показатель Биоиндекс (BIO), являющийся мерой количества хлорофилла, соответствующего пикселя изображения. Биоиндекс строится путем обработки изображения, имеющего три цветовых канала (красного, синего, зеленого). В отличие от NDVI при построении которого используется только два канала (красный, ближний инфракрасный) и требуется использование специальной аппаратуры, проведение калибровок, применение биоиндекса имеет меньше погрешностей и более точно отражает состояние посевов.

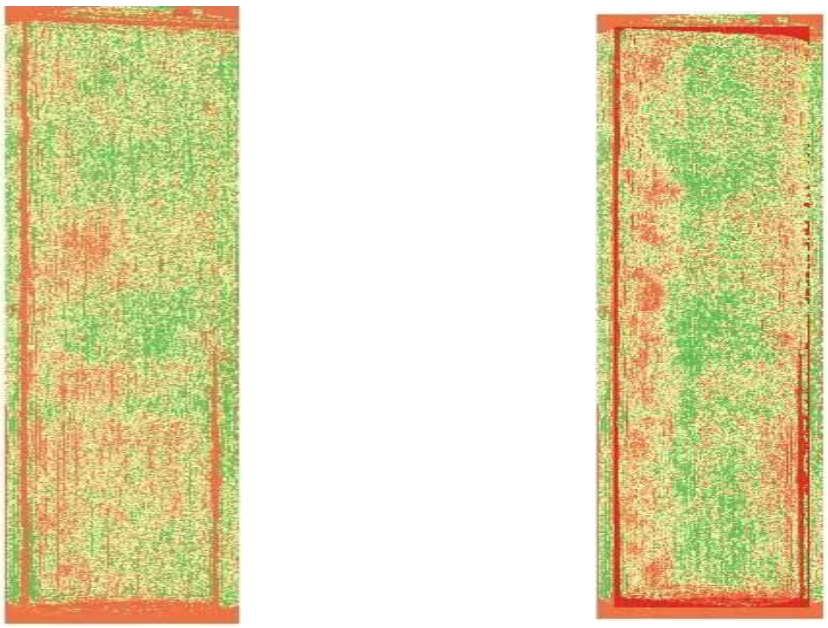
Методика получения карт–заданий с использованием Биоиндекса следующая: производится аэрофотосъемка БАС со штатной RGB камерой; полученные снимки сшиваются в ортофотоплан; ортофотоплан подвергается обработке в ПО ООО «АиС»; строится карта с распределением Биоиндекса, отражающего распределение биомассы по площади поля, участки с неоднородным распределением группируются согласно значению Биоиндекса, каждому участку присваивается норма внесения удобрений (разбивка по норме внесения производится агрономом самостоятельно, обычно принимают три нормы), на USB носитель выгружается цифровая аппликационная карта (карта-задание или карта-предписание) для бортового компьютера в соответствующем формате (shape-файлы - .shp или ISO-

XML – стандартизированный формат применяемый в ISOBUS) с указанием нормы внесения удобрений для конкретного участка поля.

Для изучения связи значений Биоиндекса и урожайности озимой пшеницы использовались снимки полей озимой пшеницы в моменты внесения первой и второй подкормки, также результаты измерений урожайности во время уборки. На поле 2.2 выполнено более 1200 замеров, на поле 2.3 – более 2200 замеров.

Для расчета параметров полета учитывались погодные условия в дни обработок: 19 февраля и 23 марта – этот день был благоприятным для полетов. Ночью было ясно, температура около +4°C, ветер слабый. Днем – облачно, но без осадков, температура до +15°C, ветер слабый (0–7 км/ч). Такие условия идеально подходят для работы БАС (принят для данного исследования DJI Mavic 2 Pro). Общая площадь 157,51 га. Расчётная высота полета – 93 метра, расчетное значение GSD 2,3 см/px. Для создания ортофотоплана приняты перекрытия 80% продольное и 70% поперечное. Размер снимка 111,87x83,9 м, количество проходов – 34, количество кадров – 1 561 шт, продолжительность полета – 83 мин, расстояние – 49,6 км. При средней продолжительности полета на одном АКБ 25 минут, необходимо 4 АКБ, либо связка 2-3 АКБ и генератор или иное зарядное устройство. Общее энергопотребление – 0,854 МДж (237,16 Вт·ч). При стоимости электроэнергии для юридических лиц (в расчетах, 7 руб./кВт·ч), затраты на зарядку не значительны, и ими можно пренебречь. Основные затраты – это износ АКБ (ресурс 200–300 циклов, при стоимости одного АКБ 20 000–25 000 руб).

Значения вариации Биоиндекса, полученные при обработке фотоснимков для поля поле 2.2 приведены на рисунке 4.7.



а) б)

Рисунок 4.7 - Карты биоиндекса поля 2.2 при подкормке: а) – первой; б) – второй

При уборке урожая измерялись географические координаты уборочной машины и фиксировалась урожайность. По исходным фото поля во время второй подкормки вычислялось значение Биоиндекса и проводилось его усреднение на участке размером 3х3 м с центром в точке с координатами, для которой фиксировалось значение урожайности при уборке. Полученные таким образом значения пар значение «Биоиндекса–урожайность» разбивались на классы. В каждый класс попадали те пары, для которых значение урожайности лежит в определенном интервале. Для каждого из этих классов вычислялось среднее значение Биоиндекса по всем парам этого класса. Полученные результаты приведены на рисунке 4.8 (поле 2.2) и рисунке 4.9 (поле 2.3).

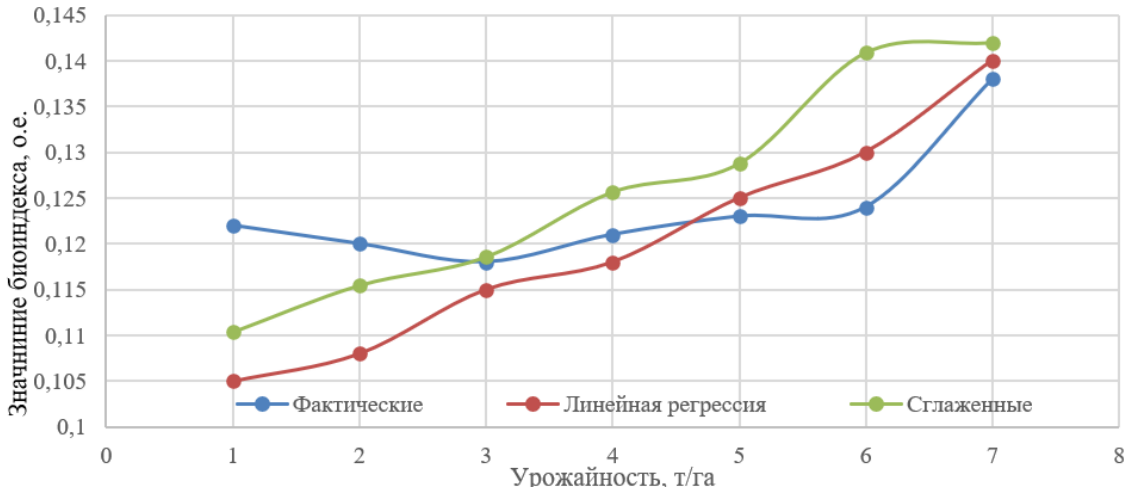


Рисунок 4.8 - График зависимости урожайности от биоиндекса по полю 2.2

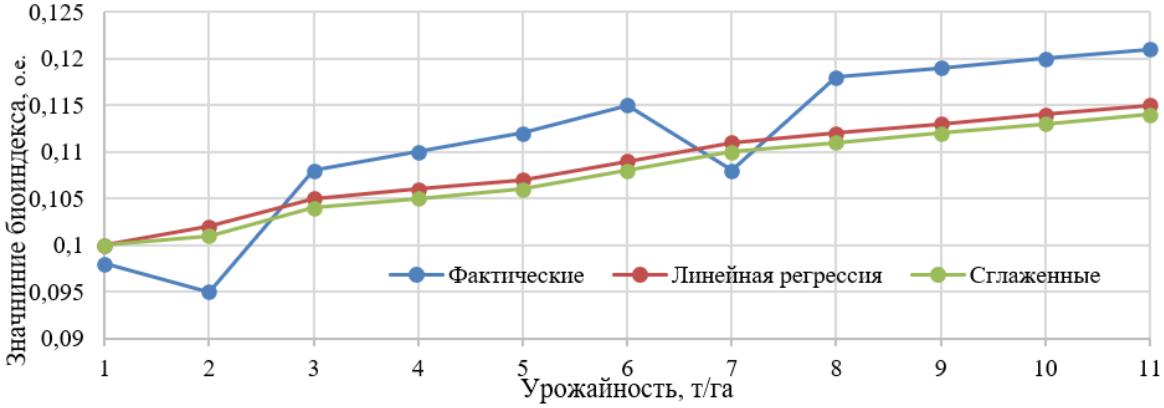


Рисунок 4.9 - График зависимости урожайности от биоиндекса по полю 2.3

Коэффициент корреляции «Биоиндекс–урожайность» по полю 2.2 составил 0,838; «сглаженный Биоиндекс–урожайность» – 0,986. Коэффициент корреляции «Биоиндекс–урожайность» по полю 2.3 составил 0,863. Коэффициент корреляции «сглаженный Биоиндекс–урожайность» составил 0,974. Усреднение проводилось путем взятия среднего значения Биоиндекса по соседним трем точкам. Зависимость биоиндекса от урожайности для случая линейной регрессии определялась по методу наименьших квадратов, для уменьшения эффекта дискретизации датчика урожайности комбайна.

Полученную карту распределения относительной отзывчивости можно использовать для повышения средней урожайности в пределах поля. Для этого на участки с большей отзывчивостью можно вносить повышенную норму удобрений

за счет уменьшения нормы внесения на менее отзывчивые участки. При этом неравномерность распределения урожайности в пределах поля может вырасти, но и средняя урожайность вырастает по сравнению с другими стратегиями распределения удобрений в пределах поля. Этот алгоритм позволяет увеличить среднюю урожайность при сохранении общей массы внесенных удобрений на все поле.

Биоиндекс, вычисляемый по фотографиям поля, выполненным с БАС штатной не мультиспектральной камерой коррелирует с урожайностью пшеницы. Это позволяет прогнозировать урожайность по фотоснимкам поля, планировать распределение нормы внесения удобрений и оптимизировать имеющиеся ресурсы. Экономия удобрений в среднем составит 10 кг/га.

Расчет экономической эффективности при использовании Биоиндекса, полученного путем обработки снимков с БАС показал, что возможна дополнительная экономия по сравнению с использований карт–заданий для дифференцированного внесения удобрений, созданных на основе индекса NDVI полученного по спутниковым данным (таблица 4.4).

Таблица 4.4 - Сравнение затрат четырех методов

Статья затрат	Метод 1: Спутник (NDVI)	Метод 2: GreenSeeker	Метод 3: БАС + Биоиндекс (Mavic 2 RGB)	Метод 4: БАС + NDVI (Mavic 3M)
Оборудование (кап. затраты)	Не требуется	20 000 000 руб.	200 000 руб.	745 000 руб.
Программное обеспечение (ПО)	150 000 руб./год	Входит в стоимость	50 000 руб./год	80 000 руб./год (DJI Terra или аналог для мультиспектр. обработки)
Обучение сотрудника	20 000 руб	100 000 руб	60 000 руб	80 000 руб (курсы + основы спектрального анализа)
Дополнительная ЗП сотрудника	Не требуется	30 000 руб./мес	20 000 руб./мес	20 000 руб./мес
Резерв на ремонт/ТО	–	–	30 000 руб./год	40 000 руб./год
Экономия удобрений (кг/га)	Базовый метод	~16	~10	~13
Капитальные затраты (первый год)	20 000 руб.	20 100 000 руб.	260 000 руб.	825 000 руб.
Ежегодные эксплуатационные затраты	154 000 руб.	4 380 000 руб.	372 000 руб.	525 000 руб.

Статья затрат	Метод 1: Спутник (NDVI)	Метод 2: GreenSeeker	Метод 3: БАС + Биоиндекс (Mavic 2 RGB)	Метод 4: БАС + NDVI (Mavic 3M)
Экономия удобрений (руб./год)	0 (база)	400 000 руб.	650 000 руб.	500 000 руб.
Чистый годовой эффект	0 (база)	–3 980 000 руб.	+278 000 руб.	–25 000 руб.
Срок окупаемости	–	> 50 лет	< 1 года	~5 лет (не окупается на 1000 га)

Общий вывод можно сделать следующий, технология GreenSeeker дает высокую эффективность в экономии удобрений (16 кг/га), но первоначальная стоимость оборудования в более чем 20 млн рублей делает его доступным только для крупных агрохолдингов с площадями не менее 20–30 тыс. га или для сервисных компаний. Наиболее эффективное решение – БАС + Биоиндекс. Исследование проведенное совместно с ООО «АиС» доказывает, что корреляция биоиндекса с урожайностью крайне высока (0,838–0,986). Это позволяет достичь максимальной экономической эффективности при минимальных вложениях, окупаемость менее года. Решение БАС + NDVI (например Mavic 3M) технологичный метод с точки зрения агрономии. Получаются точные значения NDVI и при этом нет зависимости от облачности (в отличие от спутника), первоначальные вложения не такие высокие как с азотным сканером. Решение становится экономически эффективным при увеличении обрабатываемых площадей. Точка безубыточности для него наступит примерно на 1200–1300 га. Если хозяйство больше этого порога или планирует оказывать услуги – Mavic 3M предпочтительнее Mavic 2, так как дает более надежные данные для агронома.

В ходе сравнительного анализа четырех методов создания карт-заданий для дифференцированного внесения аммиачной селитры под озимую пшеницу на полях учхоза «Краснодарское» общей площадью 157,51 га были рассчитаны коэффициенты экономической ($К_{экэ}$) и энергетической ($К_{энэ}$) эффективности. Исследование показало, что применение БАС для мониторинга состояния посевов и создания карт-заданий обеспечивает существенное преимущество как в экономическом, так и в энергетическом аспектах по сравнению с традиционными методами (технология дистанционного зондирования по космоснимкам

принималась как базовая). Расчет критерия экономической эффективности, включающего коэффициенты рентабельности инвестиций ($К_{рент}$), финансовой устойчивости ($К_{уст}$), производительности мониторинга ($К_{пром}$), замещения топлива ($К_{зам}$) и экологического эффекта ($К_{экол}$), показал лидирующее положение метода «БАС + Биоиндекс» ($К_{экэ}$ – 8,9). Это обусловлено следующими факторами: низкие капитальные затраты - 260 000 руб. в первый год (против 20,1 млн руб. у GreenSeeker и 825 000 руб. у Mavic 3M); положительный чистый годовой эффект (кроме спутникового мониторинга, который является базовым и не дает прироста); высокая производительность мониторинга ($К_{пром} = 1{,}4$) - БАС обследует порядка 60 га/ч, что в 4 раза быстрее наземных методов; срок окупаемости - менее 1 года; высокая корреляция с урожайностью - коэффициент корреляции «Биоиндекс–урожайность» составляет 0,838–0,986, что подтверждает надежность метода.

Метод «БАС + NDVI (Mavic 3M, $К_{экэ} = 3{,}77$) занимает второе место. Несмотря на технологические преимущества (точные значения NDVI, независимость от облачности), он требует значительных капитальных вложений (825 000 руб.) и имеет отрицательный чистый годовой эффект при площади 157,51 га. Точка безубыточности для этого метода наступает при площади более 1200–1300 га. Применение GreenSeeker показывает отрицательные значения $К_{экэ}$ из-за высоких капитальных затрат.

Расчет энергетической эффективности, отражающей снижение энергозатрат при переходе от традиционной технологии к методу с БАС, показал, что метод с применением БАС демонстрируют энергоположительный эффект по сравнению с традиционным наземным обследованием, т.е. позволяют сэкономить более 93% энергии ($К_{энэ}$=4,6). Применение данного метода позволяет не только снизить затраты на удобрения (экономия 10 кг/га), но и повысить урожайность за счет оптимального распределения питательных веществ в пределах поля, обеспечивая рост средней урожайности при сохранении общей массы внесенных удобрений.

4.3 Сравнительный анализ дифференцированного внесения удобрений с использованием индекса NDVI и Биоиндекса

Сравнительный анализ дифференцированного внесения удобрений с использованием индекса NDVI и Биоиндекса проводился на базе АО «Агрокомплекс» им. Н. И. Ткачева, предприятие «Север Кубани» отделение №3. Краснодарский край, Кущевский район, село Полтавченское со 2 апреля по 20 июля 2021 г. Для этого было выбрано 3 рядом расположенные поля (рисунок 4.10) под озимую пшеницу площадью 92 га (поле 10в), 96 га (поле 11в) и 99 га (поле 12в). Севооборот культур следующий: поле 10в в 2018 г. – озимая пшеница (Гром ЭС); 2019 г. – кукуруза на зерно (П8400); 2020 г. – озимая пшеница (Таня РС–1); поле 11в в 2018 г. – озимая пшеница (Таня РС–1); 2019 г. – сахарная свекла (Кассиопея); 2020 г. – озимая пшеница (Юбилейная 100); поле 12в в 2018 г. – озимая пшеница (Таня РС–1); 2019 г. – сахарная свекла (Кассиопея); 2020 г. – озимая пшеница (Юка РС–1); 2021 г. – озимая пшеница (Таня РС–1).

Цель эксперимента – сравнительный анализ дифференцированного внесения удобрений по картам–заданиям с использованием RGB (Биоиндекс) и мультиспектральной (NDVI) камер на БПЛА.

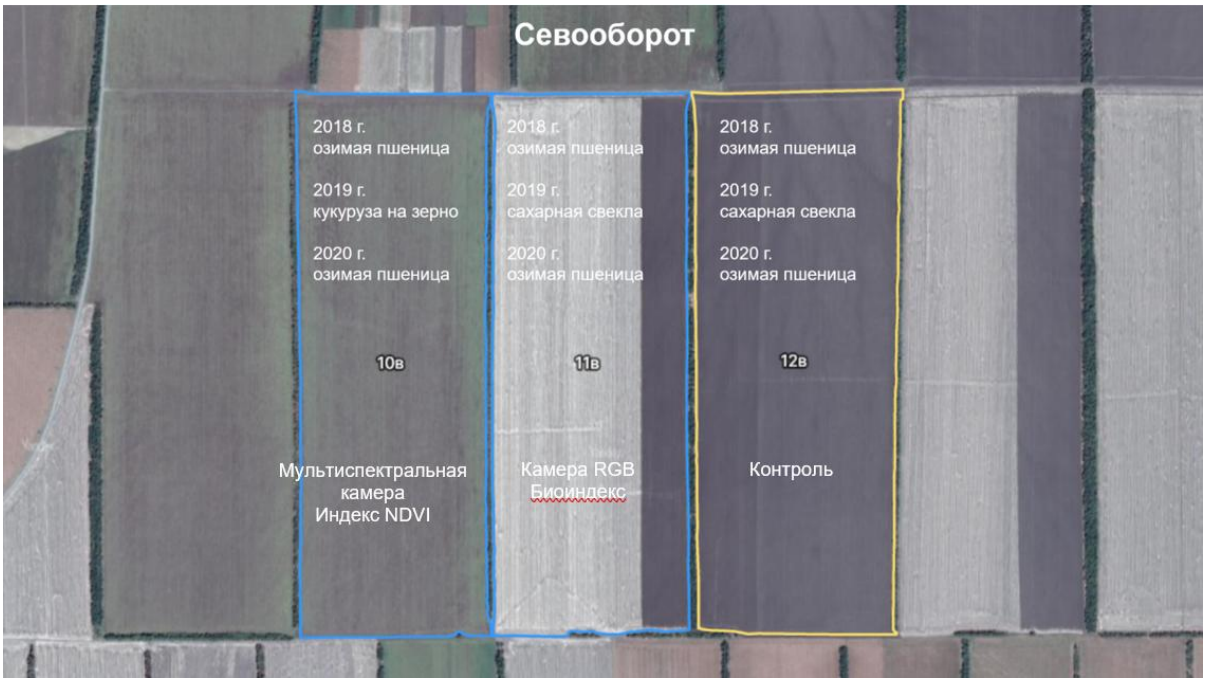


Рисунок 4.10 - Структура расположения опытных полей

Норма внесения аммиачной селитры при первой подкормке всех полей была постоянная 150 кг/га. Перед второй подкормкой на поле 10в производилась съемка мультиспектральной камерой и дифференцированно вносились удобрения с использованием карт задания на основе индекса NDVI. На поле 11в производилась съемка RGB камерой и дифференцированно вносились удобрения с использованием Биоиндекса. Поле 12в принималось за контроль с постоянной нормой внесения удобрений. Данные по второй подкормке представлены в таблице 4.5. В среднем по всем полям норма внесения составляла 130 кг/га.

Таблица 4.5 - Нормы внесения азотного удобрения при второй подкормке

Номер поля	Площадь, га	Общая масса удобрений, кг	Дозы внесения удобрений по зонам вегетации, кг/га		
			сильной	средней	Слабой
10в	92	11960	116	130	144
11в	96	12480	114	130	146
12в	99	12870	130	130	130

Внешний вид полей и БАС для исследований представлены на рисунке 4.11. Облет поля 10в осуществлялся беспилотным летательным аппаратом самолетного типа eBee с мультиспектральной камерой Sequoia, 11в – DJI Phantom 4 Pro с камерой RGB и DJI Mavic Air. По результатам облета 2 апреля 2021 г. получали карты–задания для второй подкормки. Данные, полученные методом воздушного мониторинга, так же сравнивались с данными полученными в ходе наземного мониторинга ручными средствами диагностики. Для внесения удобрений использовался тяжелый универсально–пропашной трактор John Deere–8430, предназначенный для выполнения энергоемких операций, номинальная мощность 217 кВт (295 л. с.). Для внесения удобрений использовался разбрасыватель Amazone ZA TS 4200 (312 МДж/га).

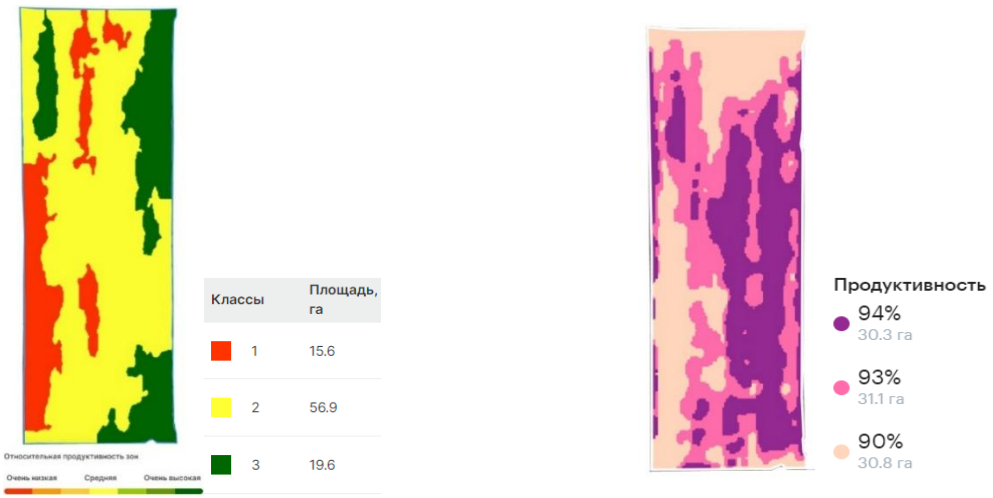


а) б)

Рисунок 4.11 - Фото проведения полевого опыта: а) – внешний вид опытных полей: справа – 10в; слева –11в; б) – беспилотные летательные аппараты для проведения съемки

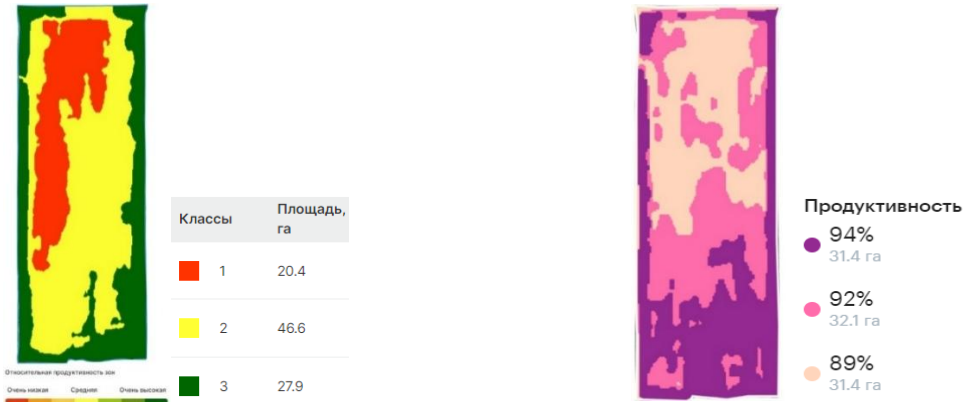
Перед проведением эксперимента провели сравнение полей в системах SkyScout и OneSoil (рисунок 4.12). Рассматривались следующие возможности данных систем: интегральные зоны с 2013 по 2021 гг. на платформе SkyScout и зоны продуктивности с 2018 по 2021 гг. в системе OneSoil. Наблюдается отсутствие оперативных снимков в некоторых системах до 1.04.2021 г. или перед непосредственным внесением удобрений. Это не позволяет учитывать актуальную ситуацию по вегетации наблюдаемой культуры.

Поле 10в (NDVI)



а) б)

Поле 11в (Биоиндекс)



в) г)

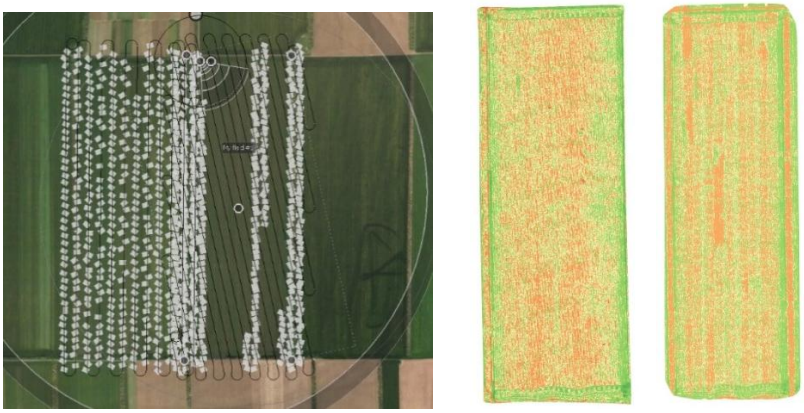
Поле 12в (Контроль)



д) е)

Рисунок 4.12 - Зоны полей: а, в, д – интегральные зоны в системе SkyScout (1.05.2013–9.06.2020 гг.); б, г, е – зоны продуктивности в системе OneSoil (2018–2021 гг.).

После облетов с БАС полученные карты и значения Биоиндекса по наблюдаемым полям (рисунок 4.13).

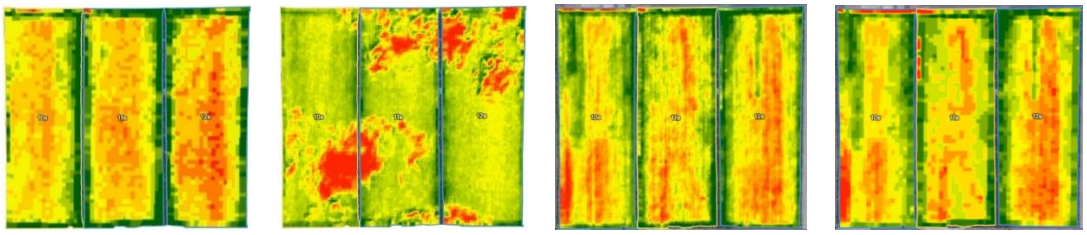


а) б) в)

Рисунок 4.13 - Поля после облета БАС (2.04.2021 г.):а) – полетное задания облета полей; б) – 10в (биоиндекс); в) – 11в (биоиндекс)

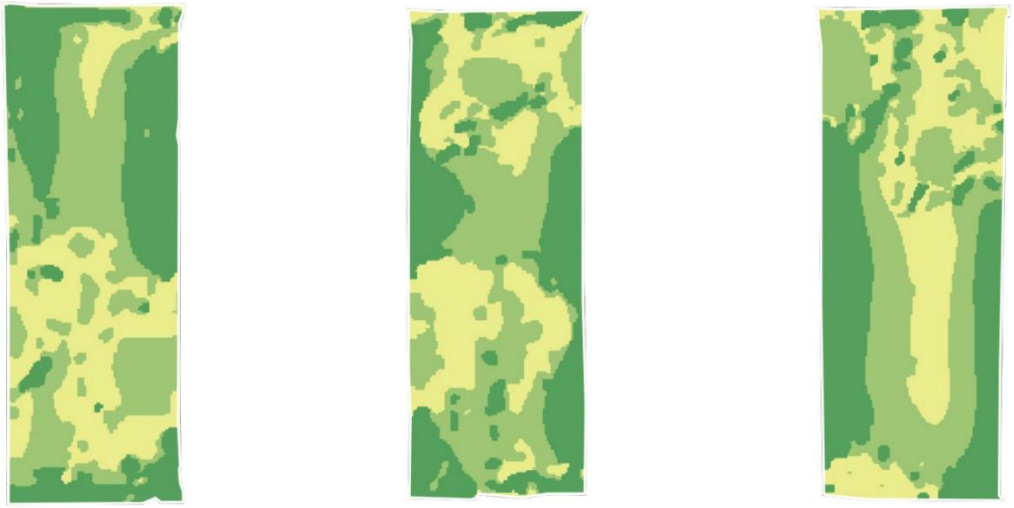
Параметры облета БАС типа Phantom 4 Pro: высота полета 110 м; скорость полета 10 м/с; перекрытие 70 %; время каждого полета 17 мин; количество снимков одного поля - примерно 600 фото.

Карты NDVI в системе SkyScout и зоны вегетации в системе OneSoil для полей 10в, 11В и 12 в приведены на рисунках 4.14–4.15.



а) б) в) г)

Рисунок 4.14 - Контрастный NDVI в системе SkyScout по датам: а) – 4.03.2021 г.; б) – 31.03.2021 г.; в) – 5.05.2021 г.; г) – 7.05.2021 г.

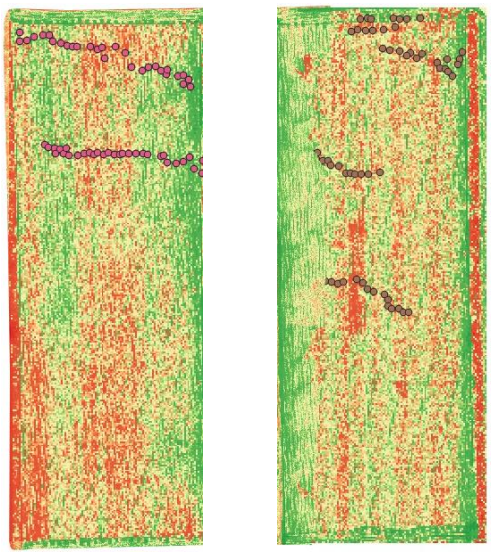


а) б) в)

Рисунок 4.15 - Зоны вегетации в системе OneSoil на 31.03.2021 г. полей: а – 10в; б – 11в; в – 12в

Методика проведения наземных измерений следующая: 8.04.2021 г. перед второй подкормкой на полях 10в и 11в производились измерения N–тестером и ручным GreenSeeker по зонам в фазе развития пшеницы 2–3 листа. Места наземных измерений полей 10в и 11в представлены на рисунке 4.16. При наземных измерениях перемещались к заданной координате, по листьям растений проводили

30 замеров N–тестером и ручным GreenSeeker. Результаты замера 13 зон приведены в таблицах Г1 и Г4 (Приложение Г).



а) б)

Рисунок 4.16 - Изображение точек наземных измерений полей: а) – 10в; б) – 11в

По полю 11в 8.04.2021 г. перед вторым внесением селитры корреляция между наземным измерением и Биоиндексом составило 0,93, корреляция между ручным GreenSeeker и проективной поверхностью 0,96.

По полю 10в 8.04.2021 г. перед второй подкормкой корреляция между NDVI и остальными величинами несколько упала, но все равно осталась высокой. Причина падения – связана с различиями в почве. Корреляция Биоиндекса и NDVI – 0,86; коэффициент корреляции между проективным покрытием и NDVI – 0,92; коэффициент корреляции между проективным покрытием и Биоиндексом – 0,98. Индекс NDVI различается примерно в 2 раза между лучшими и худшими участками. Биоиндекс и проективное покрытие различаются примерно в 6 раз, следовательно, они более чувствительны к состоянию посевов.

Карты проективного покрытия по всем точкам наземных измерений представлены в таблицах Г5 и Г6 (Приложение Г).

Уборка урожая проводилась на поле 10в – 17.07.21 г.; на поле 11в – 17–18.07.21 г.; на поле 12в – 19–20.07.21 г. Биологическая урожайность замерялась рамкой

площадь 1 м^2 в 5 точках. Результаты замера биологической урожайности на полях 10в, 11в и 12в представлены в таблицах 4.6– 4.8.

Таблица 4.6 - Результаты измерений биологической урожайности поля 10в

Номер замера	Урожайность 14.07.2021 г.		Измерения 8.04.2021 г.	
	кг/м2	ц/га	N–тестер	Ручной GreenSeeker
1	0,35369	35,4	561	0,27
20	0,59347	59,3	453	0,22
30	0,39814	39,8	512	0,34
40	0,73913	73,9	393	0,22
60	0,38913	38,9	504	0,32
Среднее	–	49,5	485	0,27
стандартное отклонение	–	16,6	64	0,06
коэффициент вариации, %	–	33,5	13	20,25
Ошибка	–	7,5	29	0,02
относит. ошибка, %	–	15,2	6	9,04

Таблица 4.7 - Результаты измерений биологической урожайности поля 11в

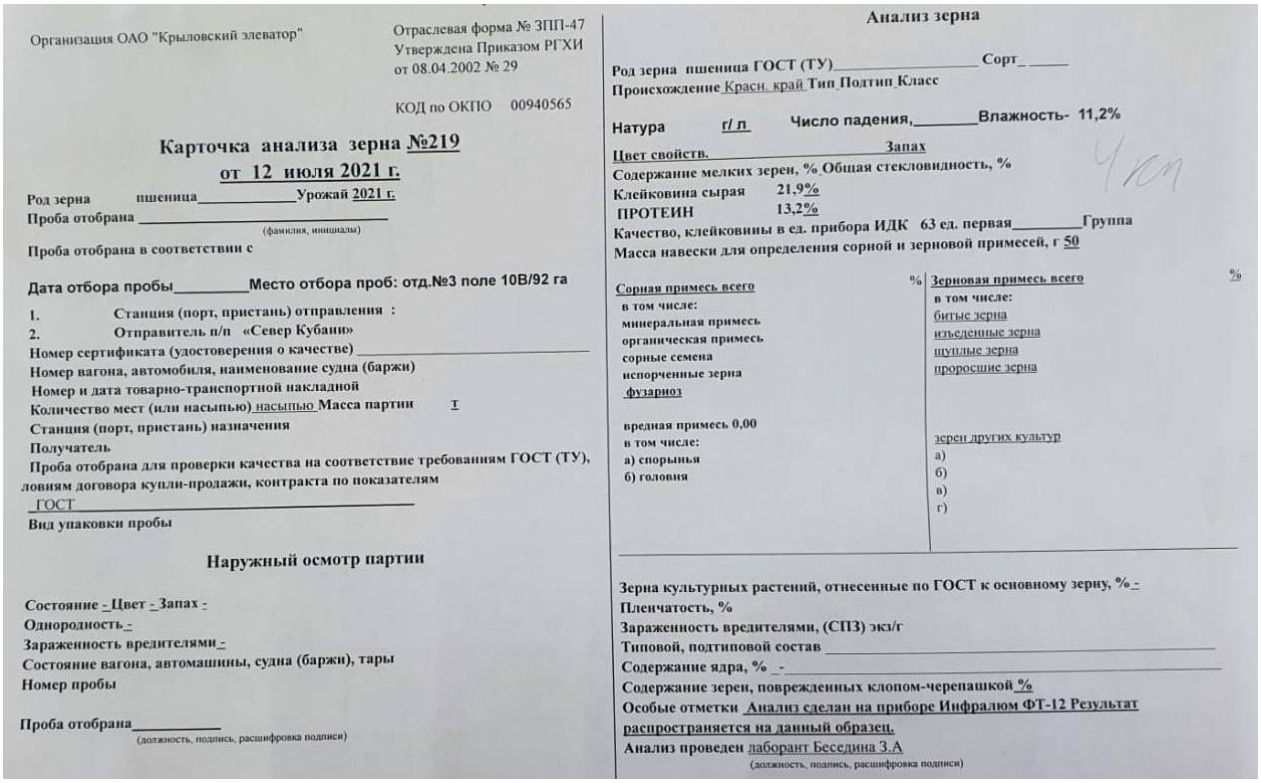
Номер замера	Урожайность 14.07.2021 г.		Измерения 8.04.2021 г.	
	кг/м2	ц/га	N–тестер	Ручной GreenSeeker
1	0,70516	70,5	451	0,40
20	0,60551	60,6	450	0,28
30	0,53057	53,1	550	0,45
40	0,46982	47,0	455	0,33
60	0,56109	56,1	410	0,29
Среднее	–	57,5	463	0,35
стандартное отклонение	–	8,8	52	0,07
коэффициент вариации, %	–	15,3	11	20,90
Ошибка	–	4,0	23	0,03
относит. ошибка, %	–	7,0	5	0,35

Таблица 4.8 - Результаты измерений биологической урожайности поля 12в

Номер замера	Масса	
	кг/м2	ц/га
1	0,34341	34,3
2	0,39250	39,3
3	0,50174	50,2
4	0,33758	33,8
5	0,40304	40,3
Среднее	39,6	39,6

Номер замера	Масса	
	кг/м2	ц/га
стандартное отклонение	–	6,6
коэффициент вариации, %	–	16,7
Ошибка	–	3,0
относит. ошибка, %	–	7,6

Урожайность по результатам измерений следующая: поле 10в – 49,5 ц/га; поле 11в – 57,5 ц/га; поле 12в – 39,6 ц/га. Результаты анализа качественных показателей (ОАО «Крыловский элеватор») следующие: содержание протеина в зерне со всех опытных участков примерно одинаковое, показатель по клейковине отличается на 1–2 % (рисунок 4.17, таблица 4.9).



Организация ОАО "Крыловский элеватор"

Отраслевая форма № ЗПП-47
Утверждена Приказом РГХИ
от 08.04.2002 № 29

КОД по ОКПО 00940565

Карточка анализа зерна №219
от 12 июля 2021 г.

Род зерна пшеница Урожай 2021 г.
Проба отобрана _____
(фамилия, инициалы)
Проба отобрана в соответствии с

Дата отбора пробы_____Место отбора проб: отд.№3 поле 10В/92 га

1. Станция (порт, пристань) отправления :
2. Отправитель п/п «Север Кубани»

Номер сертификата (удостоверения о качестве) _____
Номер вагона, автомобиля, наименование судна (баржи)
Номер и дата товарно-транспортной накладной
Количество мест (или насыпью) насыпью Масса партии т
Станция (порт, пристань) назначения
Получатель
Проба отобрана для проверки качества на соответствие требованиям ГОСТ (ТУ), ловиям договора купли-продажи, контракта по показателям
ГОСТ
Вид упаковки пробы

Наружный осмотр партии

Состояние - Цвет - Запах -
Однородность -
Зараженность вредителями -
Состояние вагона, автомашины, судна (баржи), тары
Номер пробы

Проба отобрана_____
(должность, подпись, расшифровка подписи)

Анализ зерна

Род зерна пшеница ГОСТ (ТУ)_____ Сорт_____
Происхождение Красн. край Тип Подтип Класс

Натура г/л Число падения,_____Влажность- 11,2%
Цвет свойств. Запах
Содержание мелких зерен, % Общая стекловидность, %
Клейковина сырая 21,9%
ПРОТЕИН 13,2%
Качество, клейковины в ед. прибора ИДК 63 ед. первая_____Группа
Масса навески для определения сорной и зерновой примесей, г 50

Сорная примесь всего	%	Зерновая примесь всего	%
в том числе:		в том числе:	
минеральная примесь		битые зерна	
органическая примесь		изъеденные зерна	
сорные семена		щуплые зерна	
испорченные зерна		проросшие зерна	
фузариоз			
вредная примесь 0,00		зерен других культур	
в том числе:		а)	
а) спорынья		б)	
б) головня		в)	
		г)	

Зерна культурных растений, отнесенные по ГОСТ к основному зерну, % -
Пленчатость, %
Зараженность вредителями, (СПЗ) экз/г
Типовой, подтиповой состав _____
Содержание ядра, % -
Содержание зерен, поврежденных клопом-черепашкой %
Особые отметки Анализ сделан на приборе Инфралюм ФТ-12 Результат распространяется на данный образец.
Анализ проведен лаборант Беседина З.А
(должность, подпись, расшифровка подписи)

Рисунок 4.17 - Карточка анализа зерна поля 10в

Таблица 4.9 - Качественные показатели зерна

Номер поля	Показатель	
	клейковина сырая, %	протеин, %
10в	21,9	13,2
11в	21,0	13,1
12в	19,6	13,0

Проведённый сравнительный анализ показал, что дифференцированное внесение удобрений с использованием индекса NDVI (поле 10в) и Биоиндекса (поле 11в) обеспечило прибавку урожайности по сравнению с контрольным полем 12в (равномерная норма внесения) на 9,9 ц/га и 17,9 ц/га соответственно. Наибольшая урожайность (57,5 ц/га) получена на поле 11в с применением Биоиндекса, что коррелирует с более высокой чувствительностью данного показателя к состоянию посевов. Качество зерна на полях с дифференцированным внесением по содержанию клейковины выше на 1,0%, протеина на 0,2% чем на контроле.

4.4 Результаты опытных исследований параметров опрыскивания с БАС

Для установления агротехнологических параметров и параметров полетного задания для БАС, был организован ряд поисковых производственно–полевых опытов, проводимых на научно–производственной базе ФГБОУ ВО «Кубанский государственный агарный университет» и ФГБНУ ФНЦ БЗР. В исследовании использовались два типа БАС DJI T10 и DJI T30. Опыты проводили при подходящих метеоусловиях: устойчивом состоянии приземного слоя атмосферы и скорости ветра не более 3 м/с, повторность трехкратная [34–36, 39].

В первом опыте определяли качество теоретической модели для расчета ширины опрыскивания, которую определяли по пятну на маркерной бумаге. Для фиксации зоны попадания частиц жидкости применялся краситель (рисунок 4.18).



Рисунок 4.18 - Установка маркерной бумаги

Параметры проведения опыта и результаты измерения для БАС приведены в таблице 4.10 и рисунке 4.19.

Таблица 4.10 - Параметры проведения опыта и результаты измерения для БАС DJI T10 и DJI T30

Высота, м	Повторность	Общий расход всех форсунок, л/мин		Экспериментальное значение ширины опрыскивания, м		Теоретическое значение			
		DJI T10	DJI T30	DJI T10	DJI T30	DJI T10	Ошибка, %	DJI T30	Ошибка, %
1	1	0,8	2,0	2,3	3,9	2,4	4,2	4,0	2,5
	2	1,2	2,4	2,7	4,3	2,5	8,0	4,2	2,4
	3	1,6	2,8	2,8	4,5	2,7	3,7	4,3	4,7
3	1	0,8	2,0	3,4	4,4	3,3	3,0	4,5	2,2
	2	1,2	2,4	3,2	4,9	3,4	5,9	4,7	4,3
	3	1,6	2,8	3,3	5,5	3,6	8,3	5,5	0
5	1	0,8	2,0	4,3	6,1	4,4	2,3	5,9	3,4
	2	1,2	2,4	5,1	7	4,9	4,1	6,8	2,9
	3	1,6	2,8	5,5	7,3	5,4	1,9	7,2	1,4

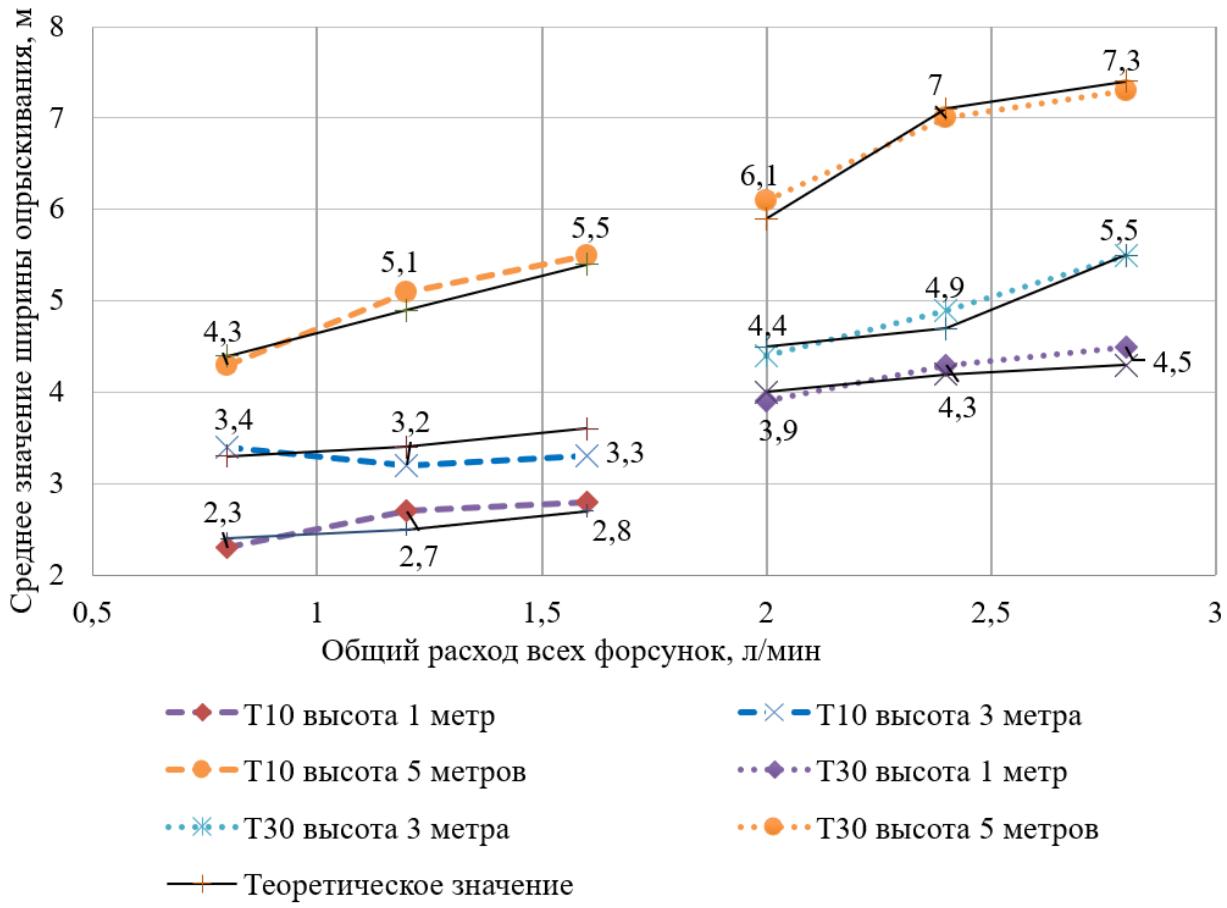


Рисунок 4.19 - График зависимости ширины обработки от высоты полета и расхода рабочего раствора

Результат сравнения теоретических значений ширины захвата с полученной практическим путем (средняя ошибка для DJI T10 - 4,6%; для DJI T30 - 2,6%) говорит о высокой точности теоретической модели.

Для определения зависимости качества опрыскивания от высоты был организован опыт на участке площадью 1 га. Норма расхода рабочей жидкости принята 7 л/га, препарат Пульсар, доза – 1л/га. Результаты опыта приведены в таблице 4.11 и рисунке 4.20.

Таблица 4.11 - Результаты измерения полевых испытаний для БАС DJI T10

Высота, м	Среднее значение ширины опрыскивания по участку, м	Теоретическое значение ширины опрыскивания, м	Ошибка, %
1	2,85	2,7	5,56
2	3,44	3,5	1,71
3	5,19	5,0	3,8
4	5,71	5,9	3,22
5	6,58	6,7	1,79



а) б) в) г) д)

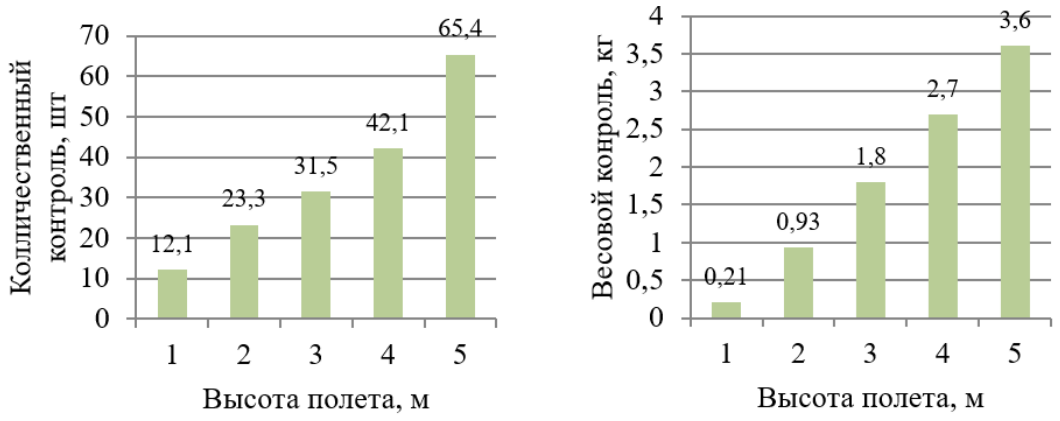
Рисунок 4.20 - Результаты обработки БАС DJI T10 на высотах: а) – 1 метр; б) – 2 метра; в) – 3 метра; г) – 4 метра; д) – 5 метров;

Для определение биологической эффективности проводили количественный и массовый учет сорняков на контрольном и опытных вариантах (рисунок 4.21 и 4.22). Сравнительные данные по засоренности на контрольном и опытном вариантах, полученные при одновременном учете после обработки БАС будут характеризовать эффективность обработки. Биологическую эффективность определяли согласно методическим указаниям по регистрационным испытаниям гербицидов в сельском хозяйстве. Регистрационную учетную площадку приняли размером 0,25 м^2. На каждом участке принимали по 10 учетных площадок.

Биологическую эффективность обработки $C_{испр}$ можно рассчитать по формуле:

$$C_{испр} = 100 - \frac{A_0^2}{B_0^2} \cdot 100 \qquad 4.1$$

где A_0^2 – число(масса) сорняков на опытном участке; B_0^2 – число (масса) сорняков на контрольном участке.



а) б)

Рисунок 4.21 - Определение биологической эффективности при работе с БАС DJI T10: а) – количественный контроль; б) – весовой контроль

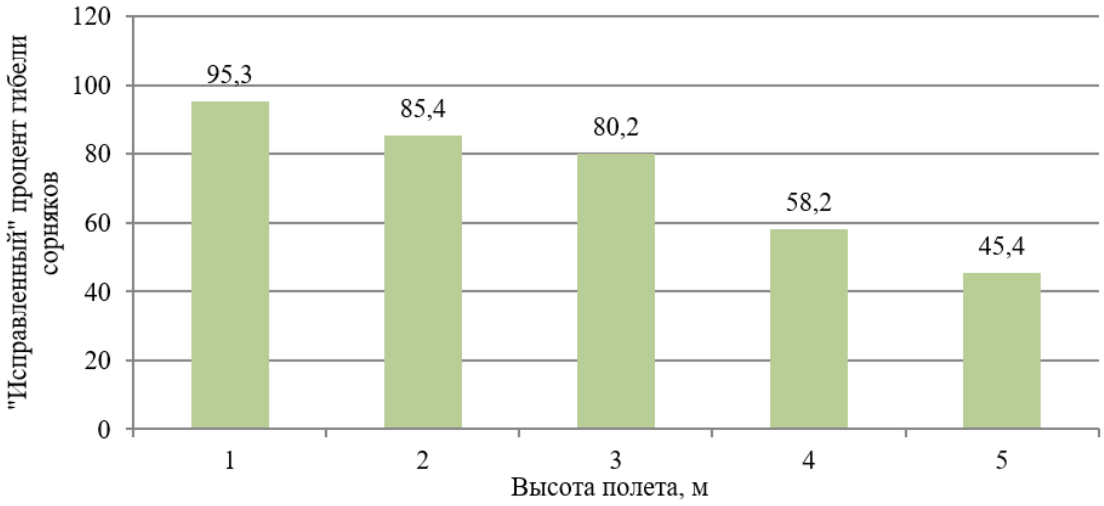


Рисунок 4.22 - Определение биологической эффективности по «исправленному проценту» гибели сорной растительности при работе с БАС DJI T10

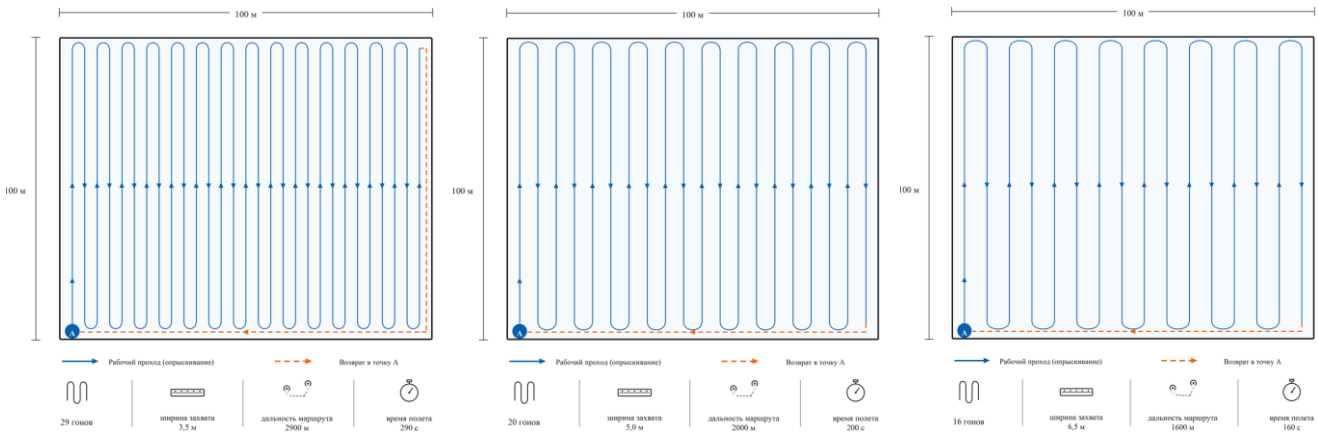
По результатам проведённых опытных исследований ширины опрыскивания с использованием БАС DJI T10 и DJI T30 установлено: максимальное отклонение фактической ширины от теоретической составляет не более 10 %, что подтверждает адекватность расчётной модели. Максимальная ошибка 5,56% при высоте 1 м, минимальная ошибка 1,71% при высоте 2 м, средняя ошибка 3,22%. Отсутствие систематического завышения или занижения свидетельствует о случайном характере погрешностей измерений, теоретические значения могут использоваться

при планировании полётных заданий без дополнительной эмпирической корректировки.

При увеличении высоты от 1 до 5 м ширина захвата возрастает для обоих типов БАС. Например, для DJI T10 при норме 0,8 л/мин ширина увеличилась с 2,3 м до 4,3 м; для DJI T30 при 2,0 л/мин – с 3,9 м до 6,1 м. Увеличение общего расхода всех форсунок расширяет зону обработки. При фиксированной высоте повышение расхода жидкости (например, с 0,8 до 1,6 л/мин для DJI T10 на высоте 5 м) приводит к росту ширины опрыскивания с 4,3 м до 5,5 м, что позволяет гибко регулировать ширину захвата. БАС DJI T30 обеспечивает большую ширину опрыскивания по сравнению с DJI T10. При сопоставимых условиях максимальная ширина для DJI T30 достигает 7,3 м, а для DJI T10 – 5,5 м, что обусловлено конструктивными различиями самих БПЛА и систем опрыскивания.

Практические рекомендации по построению полётного задания следующие: для локального опрыскивания (например, очагов сорняков) оптимальна высота 1–2 м, для максимальной производительности на больших площадях целесообразна высота 4–5 м. Условия проведения работ такие как скорость ветра (≤3 м/с) и устойчивое состояние приземного слоя атмосферы, должны соблюдаться как обязательные. Таким образом, полученные эмпирические зависимости позволяют обоснованно выбирать параметры полётного задания БАС в зависимости от требуемой ширины опрыскивания и агротехнических задач, а также оценивать не только геометрию распыла, но и биологическую эффективность обработки, производительность выполнения работ, энергетический и экономический эффект.

Для сравнения энергетических затрат при проведении работ по классической технологии и с применением БАС, произведен опыт для операции опрыскивания на участке площадью 1 га для трех БАС наиболее распространённых в операциях растениеводства: DJI T10, DJI T30 и DJI T40. Характеристики оборудования представлены в Таблице А3 (Приложение А), схемы полетов на площади 1 га для этих БАС представлены на рисунке 4.23.



а) б) в)

Рисунок 4.23 - Изображение схем пролета при опрыскивании 1 га: а) DJI T10; б) DJI T30; в) DJI T40

При заданных характеристиках БАС и условиях обработки принимаем ширину захвата 3,5, 5,0 и 6,5 м, для трех моделей соответственно. Задаем высоту полета 3 м, скорость взлета/посадки – 5 м/с, скорость во время обработки – 10 м/с. Так же примем, что БАС взлетает в точке начала обработки и после завершения обработки возвращается в эту же точку. Время полета составило 290 с, 200 с, 160 с, дальность маршрутов 2900 м (29 гонов), 2000 (20 гонов) м, 1600 (16 гонов) м, соответственно. Учтем, что в полевых условиях производится заряд АКБ от бензогенераторов, их мощности 3600 Вт, 7200 Вт, 9500Вт соответственно, при этом принято значение КПД зарядки – 90%, запас АКБ – 20 %. Энергозатраты при опрыскивании приведены для исследуемых БАС приведены в таблицах 4.12–4.14.

Таблица 4.12 - Расчет энергозатрат при полете для DJI Agras T10

Элемент	Количество	Энергия на элемент, МДж/га	$E_{\text{уд БПЛА}}$, МДж/га	Теоретическое значение, МДж/га
Взлет	1	0,26	0,26	-
Горизонтальные гоны	29	0,07	1,85	-
Повороты 180°	28	0,01	0,26	-
Распыление	1	0,13	0,13	-
Посадка	1	0,06	0,06	-
		Итого	**2,55**	**2,13 – 2,97**

Таблица 4.13 - Расчет энергозатрат при полете для DJI Agras T30

Элемент	Количество	Энергия на элемент, МДж/га	$E_{\text{уд БПЛА}}$, МДж/га	Теоретическое значение, МДж/га
Взлет	1	0,17	0,17	-
Горизонтальные гоны	20	0,05	1,02	-
Повороты 180°	19	0,01	0,15	-
Распыление	1	0,09	0,09	-
Посадка	1	0,07	0,06	-
		Итого	**1,49**	**1,00 – 1,93**

Таблица 4.14 - Расчет энергозатрат при полете для DJI Agras T40

Элемент	Количество	Энергия на элемент, МДж/га	$E_{\text{уд БПЛА}}$, МДж/га	Теоретическое значение, МДж/га
Взлет	1	0,19	0,19	
Горизонтальные гоны	16	0,04	0,69	
Повороты 180°	15	0,01	0,10	
Распыление	1	0,06	0,06	
Посадка	1	0,07	0,05	
		Итого	**1,11**	**0,73 – 1,25**

Проведенные расчеты энергозатрат для трех моделей БАС (DJI T10, T30, T40) на площади 1 га при скорости полета 10 м/с показали, что энергозатраты на горизонтальный полет для трех БПЛА составляют порядка 28–32% от общих энергозатрат (T10 – 28,4%, T30 – 30,4%, T40 – 31,8%); основные энергозатраты приходятся на повороты и остановки (63–66% от общих энергозатрат), что подтверждает определяющую роль маневрирования в структуре энергопотребления. При построении полетного задания необходимо учитывать высокую долю энергозатрат на повороты и остановки. Оптимизация полетного задания по количеству поворотов может существенно снизить долю энергозатрат на этих элементах и, соответственно, общее энергопотребление, что особенно актуально для моделей с меньшей шириной захвата (T10), где количество поворотов максимально (рисунок 4.24).

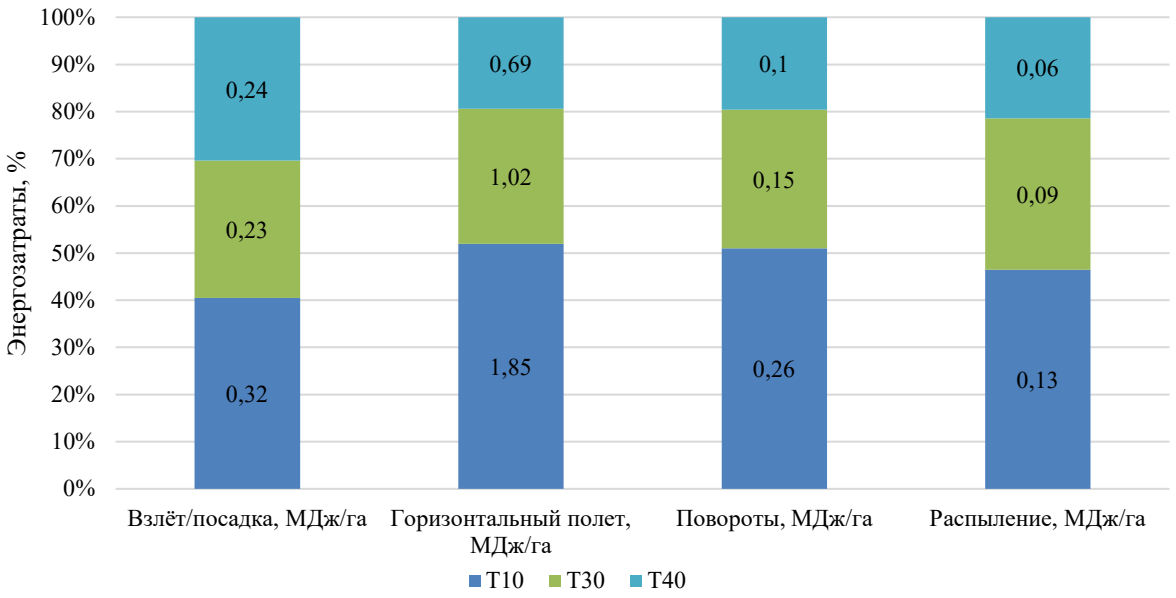


Рисунок 4.24 - Гистограмма энергопотребления БАС по элементам

Гистограмма отображает энергозатраты при применении БАС различных типов на примере опрыскивания. Аналогичны значения и по другим операциям в растениеводстве. По результатам исследования получена циклограмма нагрузок для трех типов БАС (рисунок 4.25). Сравнение эксплуатационных характеристик, исследуемых БАС и наземной техники приведены в таблице 4.15.

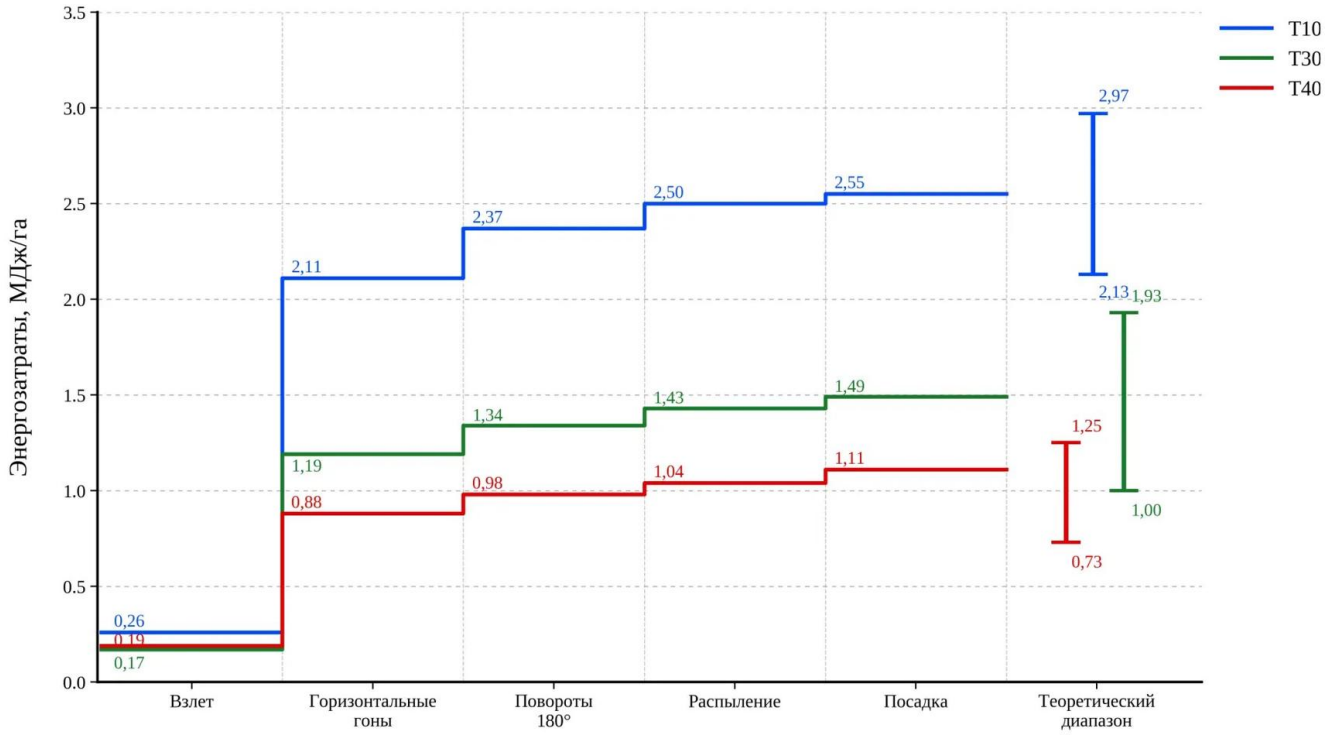


Рисунок 4.25 - Циклограмма нагрузок по БАС

Таблица 4.15 - Сравнение эксплуатационных характеристик БАС DJI T10, DJI T40 и трактора МТЗ–82

Параметр оценки	DJI T10	DJI T30	DJI T40	Трактор
1. Энергетические затраты (МДж/га)				
Расход энергии, МДж/га	2,55	1,49	1,11	360–1080 МДж/га (10–30 л дизеля)
Расход энергии генератора, МДж/га	10,3	7,3	5,1	–
Итого, МДж/га	12,85	8,79	6,21	360–1080
2. Стоимость (руб)				
Стоимость ед, млн. руб	1,8	2,4	3,4	6,5
Стоимость генератора, тыс. руб	50 (5 кВт)	60 (7,5 кВт)	80 (10 кВт)	–
Итого, млн. руб	1,85	2,46	3,48	6,5
3. Производительность (га/час)				
Ширина, м	1-5	3-9	4-12	12–24
Скорость, м/с	5-15	5-15	5-15	12
Производительность, га/ч	1,5-9	9-18	21	15
4. Экологичность				
CO_2, кг/га	6	5,4	4,8	20
Шумовое загрязнение, дБ	75	78	83	95
Влияние на почву	Нет влияния	Нет влияния	Нет влияния	Уплотнение

Подтверждаются основные направления повышения энергетической эффективности: повороты составляют 65–70% общего энергопотребления. рационализация траекторий движения позволяет снизить энергозатраты на 25–35%; оптимизация аэродинамических характеристик аппарата могут обеспечить экономию энергии в размере 10–15%; применение современных аккумуляторных батарей с повышенной энергоемкостью и оптимизация систем зарядки способны снизить энергопотребление на 8–12%; рациональный выбор параметров опрыскивания и учета метеорологических условий позволяет достичь экономии 5–12%. Комплексная реализация предложенных мероприятий позволит достичь снижения энергозатрат на 48–74%.

4.5 Использование БАС для гербицидной обработки пшеницы и внесения аммиачной селитры

Место проведения исследования – опытно–семеноводческое хозяйство (ОСХ) «Березанское». Дата проведения гербицидной обработки 25.04.2021 г., внесение аммиачной селитры 11.09.2021 г.

Сравнивалась технология гербицидной обработки наземной техникой и с применением БАС (рисунок 4.26). Использовалась наземная техника: трактор МТЗ 82 с опрыскивателем ОП 2000, ширина захвата 20 м. Расход дизельного топлива – 1,5 л/га (стоимость дизельного топлива 56 руб./литр), норма производительности работы – 130 га/смену (смена 8 часов).

В качестве БАС применялся DJI Agras T30. Гербицидная обработка проводилась препаратом «Голд Стар» (доза 20–25 гр/га), норма расхода рабочей жидкости при внесении наземной техникой - 200 л/га и 7 л/га при внесении с БАС. Сравнение производилось на двух полях по 130 га. Погодные условия в день обработки: температура воздуха от 12 до 16 °С, влажность 50–60%, скорость ветра до 5 м/с. Параметры обработки с БАС следующие: высота опрыскивания 4 м на расстоянии 80 м от лесополосы, скорость полета –до 7 м/с. В интервале 80–150 м увеличиваясь скорость обработки до 10 м/с, не снижая высоты. В интервале 150 – 250 м от лесополосы, при той же скорости обработки, снижалась высота до 3 метров. На крайнем интервале 250–500 м применялся в первоначальный режим. Средняя производительность 3,5 га за вылет, среднее время одного вылета 10 минут, поле площадью 130 га обработали за 15 часов, интервал проведения работ с 4.00 утра до 2.00 утра с перерывом в обеденное время. Ресурс АКБ DJI T30 около 1000 циклов (3000 га). БАС снабжался тремя АКБ для беспрерывного циклического режима проведения работ (стоимость одного АКБ 120 000 т.р.), расход топлива бензинового генератора 5 л/час при переменной нагрузке (АИ – 92, стоимость 47 р/л, замена моторного масла каждые 70 часов работы, объем масла 1,3 литра, стоимость 400 р/литр). Стоимость комплекта БАС DJI T30 с тремя АКБ и бензогенератором – 2 300 000 руб.



а) б)

Рисунок 4.26 - Внешний вид техники используемой в опыте: а) – трактор МТЗ 82 с опрыскивателем ОП 2000; б) – БАС DJI T30

Так же использовался смесительный узел для приготовления рабочего раствора стоимостью 300 000 руб, включающий два бака объемом 250 и 500 литров для автономного смешивания и выдачи рабочего раствора (рисунок 4.27). Для энергообеспечения собственных нужд смесительного узла (привод перемешивающих устройств) применялся бортовой бензиновый генератор мощностью 2,2 кВт (расход топлива 0,9 л/час, стоимость 25 000 руб).



а) б)

Рисунок 4.27 - Внешний вид смесительного узла: а) отсек для транпортировки; б) отсек приготовления рабочего раствора

После уборки пшеницы на поле остались растительные остатки. Культура следующего года – озимый ячмень. Для разложения растительных остатков под озимый ячмень проводили исследование по сравнению внесения селитры наземной

техникой – норма внесения 100 кг/га, период проведения работ до сева (сентябрь). Использовался МТЗ 82 с разбрасывателем минеральных удобрений, норма производительности работы – 45 га/смену (смена 8 часов). С применением DJI T30 вносили по следам после уборки комбайна, за счет этого снижали норму внесения селитры до 50 кг/га, внесение производили на валок. Стоимость селитры 15 руб./кг. Опыт проводили на учетных площадках по 6,5 га. Наземной техникой внесено 650 кг, БАС – 325 кг (рисунок 4.28).



а) б)

Рисунок 4.28 - Внещний вид поля: а) – растительные остатки до обработки; б) – растительные остатки на контрольном участке

Урожайность по пшенице составила 60,5 ц/га при обработке наземной техникой и 61,2 ц/га при обработке БАС. Урожайность по ячменю 71,6 ц/га при обработке наземной техникой и 72,2 ц/га при работе с БАС.

При расчете коэффициентов экономической и энергетической эффективности учтем, что площадь хозяйства 5000 га, и подобные технологические операции проводятся на 50 % обрабатываемых земель (50% в севообороте занимают пшеница и ячмень). Коэффициенты составляющие экономическую эффективность представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 - Занчения коэффициентов составляющих экономическую эффективность

Показатель	Полученное значение	Теоретический диапазон (из главы 2)
$K_{\text{рент}}$	3,2	0–3,4
$K_{\text{уст}}$	1,18	0,8–1,25
$K_{\text{вод рес}}$	0,96	0,8–0,98
$K_{\text{зам}}$	0,9	0,5–0,99

$K_{\text{пров}}$	1,53	0,3–2
$K_{\text{экол}}$	0,8	0,7–0,99
$E_{\text{уд БПЛА}}$, 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	135-202,5
$E_{\text{инфра БАС}}$, МДж/га	0,08	0,49-0,52
$E_{\text{сов БАС}}$, МДж/га	194,32	153,32-231,28
$К_{экэ}$	**8,57**	**8,5–10,3**
$К_{энэ}$	**15,46**	**14,75–22,22**

Коэффициент энергетической эффективности БПЛА $К_{БПЛА}$ - 18,23, энергоэффективнее традиционной наземной технологии (390,46 МДж/га у МТЗ 82 против 25,24 МДж/га для DJI T30). БАС позволяет гибко работать в любых условиях поля, снижает потребность в воде ($K_{\text{вод рес}}$ - 0,96), даёт возможность дифференцированного внесения (по валку, по карте), проведение обработок по влажной почве без уплотнения, $К_{энэ\ БАС}$ - 0,93.

Выводы по результатам исследования следующие: по урожайности разница в обоих случаях 1,2%; по экономическим затратам – БАС даёт экономию в два раза на стоимости удобрения в конкретной операции за счёт двукратного снижения нормы внесения и значительную экономию на воде и логистике (32 000 л у наземной техники и 1120 л при использовании БАС). Так же применение БАС позволит перераспределить ресурс существующего парка наземной техники на выполнение других технологических задач. Методология определения оптимальных параметров полетного задания при проведении обработок с учетом погодных условий, состояния растений, типа препарата и технических характеристик показала высокую эффективность.

4.6 Использование беспилотной технологии внесения удобрений, гербицидной, инсектицидной и фунгицидной обработок при возделывании озимого ячменя

На опытном поле учхоза «Кубань» с 8.10.2021 г. по 21.06.2022 г. проводился эксперимент по изучению дифференцированного внесения аммиачной селитры, гербицидной, инсектицидной и фунгицидной обработках при возделывании озимого ячменя с использованием сельскохозяйственного БАС и наземных средств механизации. Цель исследования: апробация беспилотной технологии внесения материалов (Agras T10) при возделывания озимого ячменя с определением урожайности и экономической эффективности в сравнении с наземной технологией обработки озимого ячменя (трактором МТЗ–1221, разбрасыватель удобрений Amazone ZA–X Perfect и опрыскиватель Amazone UF–901).

Каждый сорт озимого ячменя был посеян делянками в 3–х кратной повторности с 4–мя вариантами (рисунок 4.29). Размер каждой делянки в среднем составлял 9х1,4 м. В эксперименте принимали участие три сорта озимого ячменя: Сельхоз, Версаль, Каррера. Исходные данные представлены в таблице 4.17.

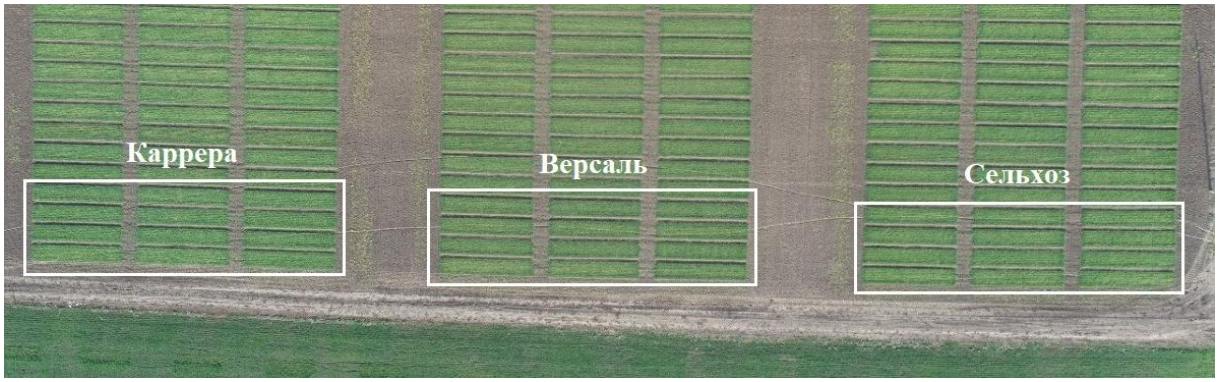


Рисунок 4.29 - Фото экспериментальных делянок под озимый ячмень

Таблица 4.17 - Исходные данные (цены на 27.11.2022 г.)

Вид обработки	Дата	Машина		Удобрения и СЗР		
		Марка	стоимость, тыс. руб.	Название	норма раствора, кг/га (л/га)	стоимость, руб./кг (л)
1. Внесение удобрений	9.03.2022 г.	Agras T10	1076	аммиачная селитра	98	20
		МТЗ–1221 +	3635 + 216		100	

		разбрасыватель Amazone ZA–X Perfect				
2. Гербицидная обработка	7.04.2022 г.	Agras T10	1076	Аксиал – 1 л/га, Дерби – 0,07 л/га	7,5	3000 + 15684
		МТЗ–80 + опрыскиватель Amazone UF–901	990 + 1006		200	
3. Фунгицидная и инсектицидная обработка	13.05.2022 г.	Agras T10	1076	Элатус Риа 0,5 л/га + Эфория 0,2 л/га	7,5	6804 + 5670

Перед подкормкой аммиачной селитрой осуществлялся облет БАС Phantom 4 Pro с получением ортофотоплана с дальнейшим преобразованием в индекс вегетации «Биоиндекс». Разделили полученные делянки с сильным и слабым развитием растений. Средняя доза внесения удобрений составляла 100 кг/га, далее производилась дифференциация удобрений на различных участках, в зависимости от состояния посевов по «Биоиндексу» (рисунок 4.30).



Рисунок 4.30 - Карта экспериментального поля с дозами внесения удобрений, кг/га (данные компании «АИС»)

Дозы внесения аммиачной селитры варьировались: сорт Сельхоз: 80 кг/га; 100 кг/га (контроль); 120 кг/га; сорт Версаль: 80 кг/га; 93 кг/га; 100 кг/га (контроль); 107 кг/га; сорт Каррера: 80 кг/га; 93 кг/га; 100 кг/га (контроль); 120 кг/га.

Удобрения на исследуемых делянках вносились 9.03.2022 г., на производственных посевах норма внесения принималась 100 кг/га. 7.04.2022 г. производилась обработка делянок гербицидом с использованием также БАС Agras T10 (рисунок 4.31). Норма внесения рабочего раствора – 7,5 л/га (препарат Аксиал – 1 л/га и Дерби – 0,07 л/га). На производственных посевах 7.04.2022 г.

производилась обработка трактором МТЗ–80 с опрыскивателем полевым Amazone UF–901 гербицидом, норма расхода – 200 л/га.

Обработка фунгицидом и инсектицидом делянок озимого ячменя с БАС проведена 13.05.2022 г. также сельскохозяйственным БАС Agras T10 (фунгицид + инсектицид: Элатус Риа 0,5 л/га + Эфория 0,2 л/га).



Рисунок 4.31 - Процессы проведения опыта: а) – Обработка делянок DJI T10; б) – Уборка урожая комбайном TERRION 2010

Уборка осуществлялась 21.06.2022 г. комбайном TERRION 2010. Перед уборкой производилось измерение действительной площади каждой делянки для достоверности подсчета урожайности. Урожай с каждой делянки собирался в отдельный мешок и нумеровался. Далее производилось взвешивание пробы с каждой делянки и определение ее влажности (рисунок 4.32).



а) б) в)

Рисунок 4.32 - Фото процесса уборки: а) - сбор урожая; б) – взвешивание; в) - определение влажности проб

В таблице 4.18 указано количество и масса урожая озимого ячменя по каждой делянке и сорту.

Таблица 4.18 - Результаты уборки урожая

Номер делянки	Сорт Сельхоз		Сорт Версаль		Сорт Каррера	
	площадь, га	масса, т	площадь, га	масса, т	площадь, га	масса, т
1.1	0,00126	0,0137	0,00124	0,0145	0,00126	0,0154
1.2	0,00126	0,0145	0,00123	0,0132	0,00126	0,0149
1.3	0,00126	0,0150	0,00123	0,0134	0,00126	–
1.4	0,00126	0,0141	0,00123	0,0134	0,00126	0,0154
2.1	0,00124	0,0151	0,00121	–	0,00127	0,0144
2.2	0,00123	0,0143	0,00121	0,0132	0,00124	0,0146
2.3	0,00126	0,0140	0,00123	0,0133	0,00125	0,0148
2.4	0,00124	0,0136	0,00123	0,0131	0,00123	0,0141
3.1	0,00127	–	0,00126	0,0149	0,00126	0,0158
3.2	0,00127	0,0144	0,00127	0,0138	0,00125	0,0118
3.3	0,00127	0,0143	0,00126	0,0135	0,00124	0,0149
3.4	0,00127	0,0143	0,00126	0,0134	0,00126	0,0148

При средней норме внесения 100 кг/га урожайность составила (таблица 4.19): сорт Сельхоз – 11,4 т/га; сорт Версаль – 11,0 т/га; сорт Каррера – 11,7 т/га. Средняя урожайность в зависимости от нормы внесения удобрений по сортам составила: сорт Сельхоз – норма внесения аммиачной селитры 80 кг/га (урожайность 11,5 т/га); 100 кг/га (11,4 т/га); 120 кг/га (11,3 т/га); сорт Версаль: 80 кг/га (10,7 т/га); 93 кг/га (11,4 т/га); 100 кг/га (11,1 т/га); 107 кг/га (10,9 т/га); сорт Каррера: 80 кг/га (11,5 т/га); 93 кг/га (11,4 т/га); 100 кг/га (12,1 т/га); 120 кг/га (11,9 т/га).

Таблица 4.19 - Сравнение урожайности по видам технологии и сортам

Технология	Сорт			
	Сельхоз	Версаль	Каррера	Средняя
Беспилотная	11,4	11,0	11,7	11,4
Наземная	11,6	10,1	11,3	11,0

Для сорта Сельхоз разница между максимальным и минимальным значениями в норме внесения составила 50 %, а в урожайности не более 2 %. Для сорта Версаль разница между максимальным и минимальным значениями в норме внесения составила 34 %, а в урожайности 6,5 %. Для сорта Каррера разница между максимальным и минимальным значениями в норме внесения составила 50 %, а в урожайности 6,1 %. Повышение урожайности при использовании беспилотной

технологии в среднем составило 3,6 %; по сорту Версаль – 8,9 %, Каррера – 6,4 %. По сорту Сельхоз снижение на 1,8 %. При использовании технологии БАС уменьшилось количество вносимых удобрений на 2 %. При применении БАС снизились расход ГСМ в 1,4 раза и металлоемкость в 26,7 раза. Дополнительные капиталовложения при использовании наземной технологии составляют 4771 тыс. руб. Коэффициент экономической эффективности $К_{экэ}$ при масштабировании для хозяйства по полученным данным составил 8,2. Это значение соответствует сценарию «полная интеграция» и находится в нижней части теоретического диапазона для операции «внесение СЗР и удобрений», что подтверждает высокую экономическую эффективность применения БАС в данном эксперименте, но есть потенциал для роста показателя за счет увеличения коэффициента загрузки. Коэффициент энергетической эффективности $К_{энэ}$ для экспериментального хозяйства составил 15,3. Полученная технологий может быть масштабирована в крупных хозяйствах Краснодарского края и других субъектах Российской Федерации.

4.7 Результаты внедрения технологии опрыскивания с электроактивированной водой для приготовления рабочего раствора пестицидов

Место проведения опыта: ФГБНУ ФНЦ БЗР, период проведения исследования 31.05.2021–23.07.2021 г. Цель опыта: исследовать способ улучшения качества рабочего раствора гербицидов с требуемыми характеристиками через управление параметрами и режимами работы электроактиватора воды при обработке наземной техникой и с БАС. Гипотеза исследования следующая: активированный раствор (анолит) улучшает растворимость препарата и сокращает затраты на уничтожение сорной растительности путем уменьшения нормы применения используемого препарата.

Методика проведения исследования: используемый препарат – Пульсар, химический класс – имидазолиноны. Норма применения препарата – 0,6; 0,8; 1,0 л/га. Количество опытных участков – 30, площадь опытного участка – 15 м^2 (рисунок 4.33), трехкратная повторность. Использовали два вида электроактивированной воды с различной минерализацией и pH, водопроводную воду и один контрольный участок (без обработки). Электроактивированная вода имела следующие показатели: анолит – pH–6,5; минерализация – 0,29 ppt; электропроводность – 0,39 мСм/см. Католит – pH–9,5; минерализация – 0,53 ppt; электропроводность – 1,1 мСм/см.



Рисунок 4.33 - Внешний вид опытных участков

Для определение биологической эффективности проводили учет по массе и количеству сорной растительности на контрольном и опытных вариантах.

Наибольший процент гибели сорной растительности был получен при использовании электроактивированной воды и составил при норме применения 0,6 л/га; 0,8 л/га; 1 л/га соответственно, 54 %; 81%; 86% для анолита, в то время как эффективность использования воды без подготовки составила 39%, 69%, 78%. Гипотеза подтвердилась, активированный раствор (анолит) улучшает растворимость препарата и сокращает затраты на уничтожение сорной растительности путем уменьшения нормы применения используемого препарата.

В целях сравнительной оценки эффективности двух технологий опрыскивания в реальных условиях были проведены полевые исследования на базе Опытной станции Кубанского ГАУ. Объектом исследований являлся гибрид подсолнечника Сури в фазе 3–4 пар листьев. Предшественник – озимая мягкая пшеница. Сравнивались две технологии: Технология 1 – опрыскивание БАС с анолитом, техника DJI T10, опыт предполагает однократную гербицидную обработку

рабочим раствором с анолитом (проводилась 5.06.2025, 18.00 вечера). Погодные условия определялись по локальной метеостанции во время обработки: температура воздуха – 25,95 °С, относительная влажность воздуха – 59,11 (18:00) – 59,75 % (19:00) Скорость ветра 1 м/с. Технология 2 – опрыскивание БАС без анолита в рабочем растворе, техника DJI T10, опыт предполагает однократную гербицидную обработку без анолита (проводилась 5.06.2025, 18.30 вечера). Погодные условия: температура воздуха – 25,7 °С, Относительная влажность воздуха– 59,11 (18:00) – 59,75 % (19:00) Скорость ветра 1 м/с.

Применяемый препарат Экспресс Голд 40 г/га, площадь обрабатываемой делянки– 0,25 га. Высота полета 2,8 м, ширина захвата 3,7 м, скорость обработки – 14,4 м/с, расход рабочего раствора – 1,3 л/мин, норма расхода рабочего раствора – 10 л/га (рисунок 4.34).



Рисунок 4.34 - Процесс опрыскивания подсолнечника

Учет сорной растительности производили по количественному и массовому контролю (таблица 4.20, рисунок 4.35).

Таблица 4.20 - Учет сорной растительности

Технология	1 БПЛА+Анолит		2 БПЛА	
№ повторности	Кол–во, шт	Масса, кг	Кол–во, шт	Масса, кг
1	5	63	9	93
2	2	56	8	44
3	3	29	5	76
Среднее	3,3	49,3	7,3	71

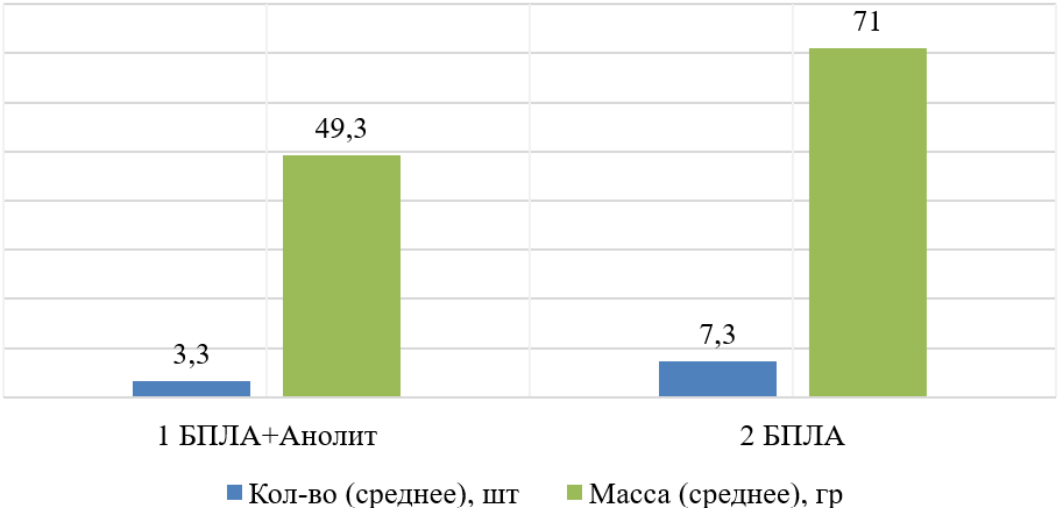


Рисунок 4.35 - Результаты учета по сорной растительности

Технология с использованием анолита обеспечивает более эффективное подавление сорной растительности по сравнению с обработкой только гербицидом (без анолита). Снижение количества сорняков более чем вдвое свидетельствует о эффекте анолита, улучшающем условия для гербицида Экспресс Голд. Меньшее снижение массы (30,6%) по сравнению с количеством (54,8%) может указывать на то, что оставшиеся сорняки имеют более крупный размер или лучше сохранили вегетативную массу. Данные по урожайности и качеству зерна представлены в таблице 4.21.

Таблица 4.21 - Урожайность и качество подсолнечника гибрида Сури

Культура	Урожайность ц/га				Масличность, %	Масса 1000 шт., г
	Повторность			Среднее		
	1	2	3			
Вода	29,8	29,6	30,2	29,9	46,1	57,9
Вода+Анолит	31,2	30,8	29,6	30,5	46,8	58

Согласно данным полученным результатам, использование анолита обеспечило прибавку урожайности в 2% с увеличением масличности на (0,7 %). Это статистически незначимое, но положительное влияние на изучаемые показатели.

В целях сравнительной оценки эффективности различных технологий опрыскивания при возделывании сои были проведены полевые исследования. Наряду с традиционной технологией, предусматривающей растворение гербицида

в воде, нами предложен способ, при котором в качестве растворителя используется анолит, и обработка предполагается двумя растворами с применением наземной техники и БАС. Объект исследований – соя, сорт Славия, в фазе 2–го тройчатого листа, предшественник – озимый ячмень.

В опыте сравнивались четыре технологии опрыскивания: технология 1 – опрыскивание с применением БАС DJI T10 (гербицид растворён в воде); технология 2 – опрыскивание с применением БАС DJI T10 с добавлением анолита в рабочий раствор; технология 3 – наземная обработка штанговым опрыскивателем Amazone UF 901 Q–plus Amaspray+ (трактор Беларус 1025.3) с использованием анолита; технология 4 – стандартная наземная обработка штанговым опрыскивателем, как в технологии 3 (гербицид растворён в воде, контрольная наземная обработка).

Обработка проводилась гербицидом Парадокс (0,35 л/га) в одинаковых агротехнических и метеорологических условиях 3.06.2025 г. в 18:00. Для авиационных технологий (1 и 2) норма расхода рабочего раствора составила 10 л/га, для наземных технологий (3 и 4) – 200 л/га (рисунок 4.36 и 4.37).

Оценка эффективности включала учёт сорной растительности (количество и масса сорняков), а также анализ урожайности и качества семян сои. Химический состав исходной водопроводной воды, использованной для приготовления рабочих растворов, приведён в Таблице 4.22. В качестве установки для получения анолита использовался диафрагменный электролизер водных растворов, разработанный в Кубанском ГАУ, производительность 60 л/ч, потребляемая мощность – 1,05 кВт, напряжение 220 В.

Таблица 4.22 - Данные об основных ионах веществ, содержащихся в водопроводной воде Кубанского ГАУ

Наименование иона	Измеренная концентрация, моль/м3
HCO_3^-	4,24
Na^+	5,44
Cl^-	0,82
SO_4^{2-}	0,478
Mg^{2+}	0,091

Наименование иона	Измеренная концентрация, моль/м3
Ca^{2+}	0,21
NO_2^-	0,022

Уровень pH исходной воды составил 8,7. В результате электролиза был получен анолит с pH 5–6.



а) б) в)

Рисунок 4.36 - Обработка с БАС: а) – процесс подготовки технология БАС; б) – задание маршрута полета; в) – процесс обработки



а) б)

Рисунок 4.37 - Обработка наземной техникой: а) – процесс подготовки опрыскивателя; б) – процесс опрыскивания по технологии 3

Результаты учета сорной растительности представлены в Таблице 4.21, урожайности в таблице 4.23 и на рисунке 4.38.

Таблица 4.23 - Результаты учета сорной растительности

№ повторности	Контроль		Технология1		Технология 2		Технология 3		Технология 4	
	Кол–во, шт	Масса, кг	Кол–во, шт	Масса, кг	Кол–во, шт	Масса, кг	Кол–во, шт	Масса, кг	Кол–во, шт	Масса, кг
1	37	230	19	22	12	22	7	18	5	20
2	30	95	9	8	11	20	8	20	11	22
3	42	135,7	24	30	14	19	7	19	15	40
Среднее	36,3	153,5	17,3	20,0	12,3	20,3	7,3	19,0	10,3	27,3

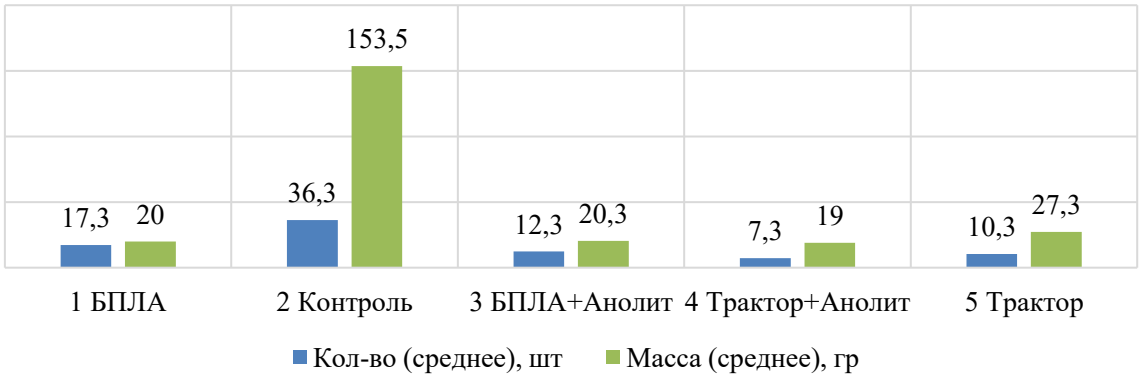


Рисунок 4.38 - Результаты измерения по остаткам сорной растительности

При одинаковом расходе рабочего раствора 10 л/га при применении БАС с анолитом повысилось подавление численности сорняков на 13,8% по сравнению с технологией БАС без анолита (таблица 4.24). Это указывает на то, что анолит в малом объеме жидкости усиливает контактное действие, удаляя большее количество растений. При стандартной норме расхода 200 л/га применение анолита так же дало максимальный результат на 8,3% лучше, чем с водой. Это доказывает, что анолит выступает в роли эффективного адъюванта, улучшающего смачивание листовой поверхности и транспортировку действующего вещества внутрь растений даже при высоких нормах расхода.

Таблица 4.24 - Урожайность сои сорта Славия с применением изучаемых технологий, ц/га

№ повторности	Контроль	Наземный + вода	Наземный + анолит	БПЛА + вода	БПЛА + анолит
1	7,8	13,9	14,3	13,6	13,7
2	8,3	14,2	13,8	14,0	14,2

№ повторности	Контроль	Наземный + вода	Наземный + анолит	БПЛА + вода	БПЛА + анолит
3	8,1	13,8	14,0	13,7	13,8
4	7,8	14,1	14,3	14,0	13,9
Среднее	8,0	14,0	14,1	13,8	13,9

Все варианты обработки показали результат значительно выше контроля (8,0 против 14,0). Наземная обработка с анолитом дала наибольший средний результат (14,1). Обработка с БАС показала чуть более низкие значения, чем наземная, но разница в границах погрешности (13,8–13,9 против 14,0–14,1).

Результаты исследований показали высокую агротехническую эффективность гербицидной обработки посевов сои с применением анолита, независимо от способа внесения. Средняя прибавка урожая относительно контроля составила 72–76%, при этом технология ультрамалообъемного опрыскивания с использованием БАС (норма расхода 10 л/га) обеспечила эффективную борьбу с сорной растительностью и урожайность, сопоставимую с традиционной технологией (наземный опрыскиватель, норма расхода 200 л/га), что свидетельствует о её высокой потенциальной эффективности. Использование электроактивированной воды (анолита) в качестве основы рабочего раствора оказало положительное влияния на формирование урожая сои в условиях проведенного опыта. Расчеты показывают, что применение электроактивированной воды (анолита) в технологии опрыскивания с БАС дает прирост коэффициента экономической эффективности $К_{экэ}$ на 0,9 за счет коэффициента рентабельности инвестиций (0,23 на сое и 1,65 на подсолнечнике). С точки зрения энергопотребления добавление электроактиватора практически не увеличивает энергозатраты, так как его потребление мало по сравнению с энергозатратами наземной техники. Коэффициент энергетической эффективности $К_{энэ}$ – 14,3. В условиях роста стоимости энергоносителей, ужесточения экологических требований и необходимости повышения общей ресурсоэффективности агропроизводства, разработка технологических приемов применения БАС и электроактивированной воды (анолита) является перспективным направлением исследований. Интеграция технологии электроактивации воды в систему точного земледелия с применением БАС,

дополненная разработанными математическими моделями и ПО, позволит перейти к интеллектуальной системе управления качеством опрыскивания, обеспечивающей максимальную биологическую эффективность при минимальных затратах ресурсов. Для установления статистической достоверности и выяснения условий, максимизирующих эффект применения электроактивированной воды, необходимо проведение расширенных многофакторных экспериментов (разные культуры, типы препаратов, дозы действующего вещества, погодные условия, параметры анолита). Рекомендуется дальнейшее изучение анолита в производственных условиях для разработки окончательных рекомендаций.

4.8 Исследования возможности применения БАС в основных операциях при возделывании риса

С целью сокращения затрат на производство товарного риса исследовалась технология применения БАС. Технология предусматривает замену агротехнологий по посеву, опрыскиванию и внесению удобрений, при этом традиционная техника не исключается полностью.

Гипотеза: посев с БАС в заранее затопленный чек исключает смыв семенного материала при затоплении и обеспечивает равномерные, благоприятные условия для прорастания. Это способствует получению дружных и полных всходов – наиболее ответственного этапа в технологии возделывания риса. Увеличение эффективности происходит также за счёт создания более благоприятных факторов для прорастания семян. Опыт проводили в два этапа: поисковый эксперимент, для определения нормы высева и производственный.

На первом этапе перед заливкой рисового чека проводилась обработка гербицидом сплошного действия с нормой 1,5 л/га, против просовидных сорняков. Опытный рисовый чек (5,7 га) заранее был заполнен водой на период 5 дней для провоцирования прорастания сорняков. Норма высева при поисковом опыте принималась 35 и 50 кг/га. Применяемый семенной материал, предварительно

пророщенный в течении 2 суток, высевается с проснувшимся зародышем. Высев риса с применением БАС может проходить в любое время суток, с одновременной заливкой рисовой системы. Азотная подкормка проводилась также с применением БАС 27.06.2021 г. Для нормы высева 35 кг/га норма внесения удобрений принята – 80 кг/га карбамида, для нормы высева 50 кг/га норма внесения удобрений – 95 кг/га карбамида. Перед уборкой проводилась обработка десикантами с применением БАС. Урожайность для нормы высева 35 кг/га – 37 ц/га, для нормы высева 50 кг/га – 42 ц/га.

На втором этапе проводились исследования применения БАС в технологии высева и обработок риса. Цель эксперимента – определение эффективности технологии БАС при возделывании риса. Техника, используемая в опыте: БАС DJI T40 – емкость бака для сыпучих материалов – 70 литров, норма высева – 180 кг/га; БАС DJI T20 – емкость бака для сыпучих материалов – 20 литров, норма высева – 160 кг/га; БАС JOYANCE – емкость бака для сыпучих материалов – 30 литров, 21 кг сыпучих материалов, норма высева – 160 кг/га. Сравнение производили с классической технологией, норма высева 300 кг/га, скорость работы при высеве – 14 км/час.

Предварительно совершены полеты на DJI Phantom 4 (GSD – 1,9 см/px), для получения ортофотоплана. Данный план использовался для построения карт–заданий по каждому рисовому чеку (рисунок 4.39а).

Масса посевного материала в баке – 43 кг. Время выработки бака – 1,5 мин, площадь посева – 0,23 га, норма высева – 180 кг/га, высота полета – 5 м, ширина захвата – 8 м. Среднее число вылетов на одном цикле заряда АКБ – 3 полета (в зависимости от карты чеков). Для заряда АКБ применялся бензогенератор, расход топлива – 30 л/смену, смена – 8 часов. Среднее время обработки чека площадью 5 га – 1 час. При этом так же фиксировалось отсутствие деформация микрорельефа чека колесами техники. Посев по предварительно залитому водой чеку снизил потери при дрейфе посевного материала, кроме того, температура воды в рисовом чеке повышается для комфортного прорастания семян. Перед засыпкой посевного материала происходит калибровка весов высевающего аппарата (рисунок 4.39б).



а) б)

Рисунок 4.39 - Подготовка оборудования: а) – карта–задание для рисового чека; б) – заправка посевного материала

Для оценки распределения семян применяли рамку 1000х1000 мм на этапе сева и всходов (рисунок 4.40), результаты измерения представлены в таблице 4.25.



Рисунок 4.40 - Измерение равномерности распределения семенного материала с применением БАС: а) – на момент посева; б) – на момент всходов

Таблица 4.25 - Данные измерений по качеству посева

Норма высева, кг/га	Кол–во семян	Стандартное отклонение	Вариация %	Ошибка	Относительная ошибка, %
180	417	134	33	44	10
160	387	43	11	15	4

Внесений удобрений на опытных участках так же проводили с применением БАС. Проводили две подкормки карбамидом в фазах 3–4 и 8–9 настоящих листьев.

Внесение СЗР проводилось с применением БАС DJI T20 и JOYANCE. Применялся почвенный гербицид, гербицид сплошного действия, селективные

гербициды, инсектициды, фунгициды и десиканты. Скорость ветра при обработке – 0–1 м/с, температура – 22,5 С, влажность воздуха – 64 % (рисунок 4.41).



а) б) в)

Рисунок 4.41 - Фото этапо проведения опыта: а) – заправка рабочего раствора; б) – посев ; в) – смесительный узел

Расход рабочей жидкости – 8 л/га, высота обработки – 3 м, ширина захвата – 5,5 м, скорость обработки – 20 км/ч. Результаты измерения урожайности представлены в таблице 4.26.

Таблица 4.26 - Результаты опыта

Способ высева	Норма высева кг/га	Кол–во метелок, шт/м2	Кол–во посеянных семян, шт/м^2	Урожайность, ц/га
Agras T40	180	1261	417	87
Joyance	160	1562	387	90,6
Сеялка	300	737	–	82,4

На основании проведённых исследований возможности применения БАС в основных операциях при возделывании риса можно сделать следующие выводы: посев с БАС в заранее затопленный чек обеспечивает исключение смыва семенного материала, равномерное распределение семян и создание благоприятных условий для прорастания, что способствует получению дружных и полных всходов, при снижении нормы высева (в 1,7–1,9 раза ниже при одновременном увеличении урожайности); равномерность распределения семян характеризуется относительной ошибкой 4–10 %, что свидетельствует о приемлемой точности высева БАС для производственного применения; отсутствие заезда тяжёлой техники в чек исключает деформацию микрорельефа, что особенно важно для поддержания уровня воды; среднее время обработки чека площадью 5 га составляет 1 час, что сопоставимо с производительностью наземной техники; БАС

успешно применены не только для посева, но и для мониторинга, внесения удобрений (карбамид в фазах 3–4 и 8–9 листьев), а также для внесения гербицидов, инсектицидов, фунгицидов и десикантов. Коэффициент экономической эффективности $К_{экэ}$ получается довольно высокий – на уровне 10,1 за счет высокой загрузки техники в течении всего периода выращивания риса. При этом коэффициент энергетической эффективности оказывается низким $К_{энэ}$ – 12,7 по сравнению с теоретическим диапазоном из-за высокой энергоемкости процесса посева, большой доли участия персонала, в том числе для заполнения бака разбрасывателя и сложной логистики перемещения экипажей операторов по рисовым чекам. Рекомендуется дальнейшее исследование БАС в производственных условиях с уточнением оптимальных норм высева под конкретные сорта риса и детальная проработка всех технологических этапов и мобильного оборудования (например, мобильных транспортеров для загрузки семенного материала).

Полученные данные были рассмотрены на экспертной научно-технической секции «Механизация» научно-технического совета министерства сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Краснодарского края и комиссией Министерства топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства Краснодарского края (Приложение Д). Комиссии подтвердили, что результаты исследования являются актуальными и имеющими важное народно-хозяйственное значение для динамично-устойчивого развития аграрного сектора сельских территорий и социального роста уровня жизни населения, а также позволяют повысить качество продукции растениеводства и надежность и качество энергоснабжения предприятий топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства Краснодарского края. Рекомендовано результаты научных исследований и сформированные на их основе научные положения по применению БАС в растениеводстве использовать для внедрения во все категории растениеводческих предприятий различной специализации Краснодарского края, а также к использованию при проведении научных исследований.

4.9 Выводы по главе

1. В ходе сравнительного анализа расчётных и экспериментальных значений удельных энергозатрат для БАС DJI Phantom 4 (RGB) и DJI Phantom 4 Multispectral относительная ошибка составила 7,74 %, что подтверждает корректность разработанной модели динамики полёта. Основные расхождения связаны с влиянием температуры воздуха на эффективность аккумуляторов, что указывает на необходимость введения температурных поправок при прогнозировании в летний период.

2. Эффективность дифференцированного внесения удобрений зависит от метода получения вегетационного индекса. Сравнение спутниковых данных, азотного сканера GreenSeeker, Биоиндекса (RGB–камера БАС) и мультиспектральной съёмки показало, что наиболее экономически и энергетически эффективным способом является использование БАС с расчётом Биоиндекса, коэффициент экономической эффективности 8,9; коэффициент энергетической эффективности 4,6 (оба значения соответствуют теоретическим расчетам), обеспечивающим окупаемость вложенных средств менее одного года при коэффициенте корреляции с урожайностью до 0,986. В отличие от NDVI, Биоиндекс не требует дорогостоящей мультиспектральной аппаратуры, калибровок на тип почвы и устойчив к неравномерности освещения, что делает его предпочтительным для оперативного формирования карт–заданий.

3. Применение БАС для обработки СЗР и внесения удобрений обеспечивает сопоставимую с наземной техникой биологическую эффективность при значительном снижении расхода рабочего раствора. В опытах с обработкой пшеницы, ячменя, сои и подсолнечника использование БАС и электроактивированного раствора показало урожайность, близкую к традиционной технологии (200 л/га). При этом применение электроактивированной воды (анолита) позволило повысить биологическую эффективность гербицидов на 15–25 % по сравнению с обычной водой. Во всех опытах значения коэффициентов

экономической и энергетической эффективности лежат в диапазоне, полученном теоретическим путем, не смотря на возникшие энергозатраты электротехнического оборудования ($К_{экэ}$ от 8,2 до 8,57; $К_{энэ}$ = от 15,3 до 15,46).

4. Технологии высева и ухода за рисом с использованием БАС позволяют снизить норму высева и повысить урожайность. При высеве риса с БАС норма высева была снижена с 300 до 160–180 кг/га, а урожайность достигла 87–90,6 ц/га, что превысило показатели сеялки (82,4 ц/га). Отсутствие механического воздействия на микрорельеф снижает энергозатраты на обработку почвы за счет переуплотнения почвы. Возможность посева по водной поверхности снижают потери семян и способствуют равномерности всходов. Коэффициент экономической эффективности имеет высокое значение - 10,1 за счет высокой загрузки техники, при этом коэффициент энергетической эффективности имеет относительно низкое значение – 12,7 из-за высокой энергоемкости процесса посева, большой доли участия персонала и высоких транспортных энергозатрат.

5. Комплексное применение БАС на всех этапах возделывания культур (мониторинг, дифференцированное внесение удобрений, обработка СЗР и посев) обеспечивает ресурсосбережение и повышение точности агротехнологий. Экспериментальные данные подтверждают возможность интеграции беспилотных технологий в производственные процессы с достижением повышения урожайности, экономии удобрений, снижением энергозатрат и улучшением качественных показателей. Результаты работы одобрены и рекомендованы для широкого применения на экспертной научно-технической секции «Механизация» научно-технического совета министерства сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Краснодарского края и комиссией Министерства топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства Краснодарского края.

5. ТЕХНИКО–ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ВНЕДРЕНИЯ БАС В РАСТЕНИЕВОДСТВО

5.1 Оценка повышения эффективности эксплуатации БАС на типовых модельных предприятиях

Для подтверждения адекватности предлагаемой методологии приведем сравнение инновационной технологии со стандартным методом чистой приведённой стоимости (NPV) для двух моделей предприятий: малое – до 300 га, и крупное – более 5000 га, средняя урожайность принятая в расчете 45 ц/га, стоимость продукции 15 руб./кг.

Базовые параметры моделей хозяйства: Модель А – малое сельскохозяйственное предприятие, общая площадь – 300 га. Структура посевов: пшеница 50% (150 га), ячмень 20% (60 га), кукуруза 10% (30 га), подсолнечник 10% (30 га), соя 10% (30 га), годовой оборот ~18 млн руб. Модель Б – крупное сельскохозяйственное предприятие, общая площадь – 5000 га. Структура посевов: пшеница 40% (2000 га), ячмень 20% (1000 га), кукуруза 15% (750 га), подсолнечник 15% (750 га), соя 10% (500 га), годовой оборот: ~337,5 млн руб.

Кредитные параметры: ставка по кредиту 25% годовых, инфляция 20% годовых, срок кредита 3 года, доля заемных средств – 50% от инвестиций, горизонт расчета 5-6 лет, ставка дисконтирования 12%, инфляция применяется ко всем денежным потока. Сезонность работ учтена через коэффициент загрузки.

Технические допущения: время работы БАС – 9 месяцев в году, ресурс АКБ 500 циклов (2 сезона), погодные ограничения - 20% дней непригодны для полетов. Технические ограничения: не учитывается моральный износ оборудования, предполагается 100% доступность техники (нет простоев), не учитываются экстремальные погодные условия. Экономические ограничения: постоянные цены на продукцию и ресурсы, отсутствие рисков изменения законодательства, идеальная кредитная история предприятия, отсутствие страховых выплат и форс–мажоров. Агрономические ограничения: однородность почвенно–климатических

условий, стабильность сортового состава культур, отсутствие массовых поражений вредителями, линейная зависимость урожайности от качества обработки.

Для сценария с аутсорсингом принимаем стоимость работ по мониторингу 70 руб./га, стоимость работ по опрыскиванию 1200 руб./га, полный цикл работ, включая анализ данных.

Сценарий 1 - Пилотный проект. Цель: тестирование технологии, площадь – 10% от общих посевных площадей, оборудование – БАС для мониторинга (базовый). Необходимо обучение одного оператора. Операции – только мониторинг, срок реализации 1 год.

Сценарий 2 - Частичное внедрение. Цель: оптимизация ключевых процессов, площадь - 50% от общей, оборудование - БАС для мониторинга (с улучшенными камерами), БАС для опрыскивания (T10), базовое ПО, операции (мониторинг + опрыскивание гербицидами), срок реализации 2–3 года

Сценарий 3 - Полная интеграция. Цель: цифровизация всех процессов, площадь – 100% от общей, оборудование - БАС для мониторинга (Matrice T30 с полным комплектом оборудования), БАС для опрыскивания (T30/T40), смесительный узел, серверное оборудование, ПО профессионального уровня, операции - полный цикл (мониторинг, посев, опрыскивание, внесение удобрений). Срок реализации 3–5 лет.

Сценарий 4 - Кооперативный. Цель: совместное использование дорогостоящего оборудования, площадь – 100% от общей и оказание услуг соседним хозяйствам. Оборудование как в Сценарии 3, условия – совместная собственность или кооперативная аренда.

Исходные данные на примере сценария 3 (Модель А):

Инвестиции: $I_0 = 5000$ тыс. руб.

Годовая экономия (денежный поток до налогообложения):

$$CF_{\text{до налога}} = 1454{,}3 \text{ тыс. руб./год}$$

Амортизация (линейная, 6 лет):

$$A = \frac{I_0}{5} = \frac{5000}{5} = 833{,}3 \text{ тыс. руб./год}$$

Налогооблагаемая прибыль:

$$P_{\text{нал}} = CF_{\text{доналога}} - A = 1454{,}3 - 833{,}3 = 620{,}96 \text{ тыс. руб./год}$$

Налог на прибыль (20%):

$$H = 0{,}2 \cdot 454{,}3 = 90{,}86 \text{ тыс. руб./год}$$

Чистый денежный поток после налога:

$$CF_t = 1454{,}3 - 90{,}86 = 1363{,}44 \text{ тыс. руб./год}$$

Дисконтирование денежных потоков (6 лет):

$$NPV = -5000 + \sum_{t=1}^{5} \frac{1363{,}44}{(1+0{,}12)^t}$$

Дисконтирующие множители приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Дисконтирующие множители

Год t	$(1{,}12)^t$	$\frac{1}{(1{,}12)^t}$	Дисконтированный поток, тыс. руб.
1	1,1200	0,8929	1217,4
2	1,2544	0,7972	1087,0
3	1,4049	0,7118	970,5
4	1,5735	0,6355	866,5
5	1,7623	0,5674	773,7
6	1,9738	0,5066	1163,44

Сумма дисконтированных потоков равна:

$$\sum_{t=1}^{6} \frac{CF_t}{(1{,}12)^t} = 1217{,}4 + 1087{,}0 + 970{,}5 + 866{,}5 + 773{,}7 + 589{,}3 = 5504{,}4 \text{ тыс. руб.}$$

$$NPV = -5000 + 5504{,}4 \ = 504{,}4 \text{ тыс. руб.}$$

Произведем расчёт для Модели А, Сценарий 2, собственные средства.

Исходные данные: инвестиции: $I_0 = 1800$ тыс. руб.; годовая экономия: $1209{,}2$ тыс. руб./год; амортизация: $A = 1800/5 = 360$ тыс. руб./год; налогооблагаемая прибыль: $1209{,}2 - 360 = 849{,}2$ тыс. руб./год; налог (20%): $0{,}2 \times 849{,}2 = 169{,}84$ тыс. руб./год

Чистый денежный поток: $CF = 1209{,}2 - 169{,}84 = 1039{,}36$ тыс. руб./год.

Дисконтирующие множители приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Дисконтирующие множители

Год	Дисконт-фактор	Дисконтированный поток, тыс. руб.
1	0,8929	928,1
2	0,7972	828,6
3	0,7118	739,9
4	0,6355	660,5
5	0,5674	589,7

Сумма дисконтированных потоков:

$$\sum = 928{,}1 + 828{,}6 + 739{,}9 + 660{,}5 + 589{,}7 = 3746{,}8 \text{ тыс. руб.}$$

$$NPV = -1800 + 3746{,}8 = 1946{,}8 \text{ тыс. руб.}$$

Внутренняя норма доходности при $r = 35\%$ приведена в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Внутренняя норма доходности ($r = 35\%$)

Год	$(1{,}35)^t$	Дисконт-фактор	Дисконтированный поток
1	1,35	0,7407	769,8
2	1,8225	0,5487	570,3
3	2,4604	0,4064	422,4
4	3,3215	0,3011	313,0
5	4,4840	0,2230	231,8

$$\sum = 769{,}8 + 570{,}3 + 422{,}4 + 313{,}0 + 231{,}8 = 2307{,}3 \text{ тыс. руб.}$$

$$NPV(35\%) = -1800 + 2307{,}3 = 507{,}3 \text{ тыс. руб.}$$

Внутренняя норма доходности при $r = 45\%$ приведена в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Внутренняя норма доходности ($r = 45\%$)

Год	$(1{,}45)^t$	Дисконт-фактор	Дисконтированный поток
1	1,45	0,6897	716,8
2	2,1025	0,4756	494,3
3	3,0486	0,3280	340,9
4	4,4205	0,2262	235,1
5	6,4098	0,1560	162,1

$$\sum = 716{,}8 + 494{,}3 + 340{,}9 + 235{,}1 + 162{,}1 = 1949{,}2 \text{ тыс. руб.}$$

$$NPV(45\%) = -1800 + 1949{,}2 = 149{,}2 \text{ тыс. руб.}$$

Интерполяция полученных результатов:

$$IRR = 35 + \frac{507{,}3}{507{,}3 - 149{,}2} \cdot (45 - 35) = 35 + \frac{507{,}3}{358{,}1} \cdot 10 = 35 + 14{,}16 = 49{,}16\%$$

Дисконтированный срок окупаемости (DPP) приведен в таблице 5.5.

Таблица 5.5 - Накопленный дисконтированный поток

Год	Поток	Накопленный
0	-1800	-1800
1	+928,1	-871,9
2	+828,6	-43,3
3	+739,9	+696,6

$$DPP = 2 + \frac{43{,}3}{739{,}9} = 2 + 0{,}058 = 2{,}06 \text{ года}$$

Расчёт для Модели Б (крупное хозяйство, 5000 га) по Сценарию 3 (собственные средства), произведен по следующим исходным данным: инвестиции: $I_0 = 5000$ тыс. руб.; годовая экономия: $CF_{\text{доналога}} = 4200$ тыс. руб./год. Амортизация при таких условиях равна:

$$A = 5000/5 = 1000 \text{ тыс. руб./год}$$

Налогооблагаемая прибыль: $4200 - 1000 = 3200$ тыс. руб./год; налог (20%): $0{,}2 \cdot 3200 = 640$ тыс. руб./год; чистый денежный поток: $CF = 4200 - 640 = 3560$ тыс. руб./год. Дисконтирующие множители приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 - Дисконтирующие множители

Год	Дисконт-фактор	Дисконтированный поток, тыс. руб.
1	0,8929	3178,7
2	0,7972	2838,0
3	0,7118	2534,0
4	0,6355	2262,4
5	0,5674	2020,0

$\sum = 3178{,}7 + 2838{,}0 + 2534{,}0 + 2262{,}4 + 2020{,}0 = 12833{,}1$ тыс. руб.

$$NPV = -5000 + 12833{,}1 = 7833{,}1 \text{ тыс. руб.}$$

Внутренняя норма доходности при $r = 60\%$ приведена в таблице 5.7.

Таблица 5.7 - Внутренняя норма доходности ($r = 60\%$)

Год	$(1{,}6)^t$	Дисконт-фактор	Дисконтированный поток
1	1,6	0,6250	3560 × 0,6250 = 2225,0
2	2,56	0,3906	3560 × 0,3906 = 1390,5
3	4,096	0,2441	3560 × 0,2441 = 869,0
4	6,5536	0,1526	3560 × 0,1526 = 543,3
5	10,4858	0,0954	3560 × 0,0954 = 339,6

$\sum = 2225{,}0 + 1390{,}5 + 869{,}0 + 543{,}3 + 339{,}6 = 5367{,}4$ тыс. руб.

$$NPV(60\%) = -5000 + 5367{,}4 = 367{,}4 \text{ тыс. руб.}$$

Внутренняя норма доходности при $r = 65\%$ приведена в таблице 5.7.

Таблица 5.8 - Внутренняя норма доходности ($r = 65\%$)

Год	$(1{,}65)^t$	Дисконт-фактор	Дисконтированный поток
1	1,65	0,6061	3560 × 0,6061 = 2157,7
2	2,7225	0,3673	3560 × 0,3673 = 1307,6
3	4,4921	0,2226	3560 × 0,2226 = 792,5
4	7,4120	0,1349	3560 × 0,1349 = 480,2
5	12,2298	0,0818	3560 × 0,0818 = 291,2

Сумма = 2157,7 + 1307,6 + 792,5 + 480,2 + 291,2 = 5029,2 тыс. руб.

$$NPV(65\%) = -5000 + 5029{,}2 = 29{,}2 \text{ тыс. руб.}$$

$$IRR = 60 + \frac{367{,}4}{367{,}4 - 29{,}2} \cdot (65 - 60) = 60 + \frac{367{,}4}{338{,}2} \cdot 5 = 60 + 5{,}43 = 65{,}43\%$$

Дисконтированный срок окупаемости приведен в таблице 5.9.

Таблица 5.9 - Дисконтированный срок окупаемости (DPP)

Год	Поток	Накопленный
0	-5000	-5000
1	+3178,7	-1821,3
2	+2838,0	+1016,7

$$DPP = 1 + \frac{1821{,}3}{2838{,}0} = 1 + 0{,}642 = 1{,}64 \text{ года}$$

Расчёт для сценария с кредитом, Модель Б, Сценарий 3, кредит 50%.

Исходные данные: инвестиции собственные: $I_{\text{соб}} = 2500$ тыс. руб.; кредит: $I_{\text{кр}} = 2500$ тыс. руб.; ставка по кредиту 25% годовых; срок кредита 3 года; ежегодный платёж (аннуитетный):

$$P = I_{\text{кр}} \cdot \frac{0{,}25 \cdot (1 + 0{,}25)^3}{(1 + 0{,}25)^3 - 1} = 2500 \cdot \frac{0{,}25 \cdot 1{,}9531}{1{,}9531 - 1} = 2500 \cdot \frac{0{,}4883}{0{,}9531}$$

$$= 2500 \cdot 0{,}5123 = 1280{,}8 \text{ тыс. руб./год}$$

Чистый денежный поток с учётом кредита:

$$CF_{\text{доналога}} = 4200 \text{ тыс. руб./год}$$

Амортизация:

$$A = 5000/5 = 1000 \text{ тыс. руб./год}$$

Проценты по кредиту (в среднем за 3 года):

Год 1: $2500 \cdot 0{,}25 = 625$ тыс. руб.

Год 2: $(2500 - 1280{,}8 + 625) \cdot 0{,}25 \approx 461{,}1$ тыс. руб.

Год 3: $\approx 288{,}5$ тыс. руб.

Для упрощения возьмём средний процент:458 тыс. руб./год

Налогооблагаемая прибыль:

$$P_{\text{нал}} = 4200 - 1000 - 458 = 2742 \text{ тыс. руб./год}$$

Налог (20%): $0{,}2 \cdot 2742 = 548{,}4$ тыс. руб./год

Чистый денежный поток (первые 3 года с учётом платежей по кредиту):

$$CF_t = 4200 - 548{,}4 - 1280{,}8 = 2370{,}8 \text{ тыс. руб./год}$$

В 4-й и 5-й годы кредит погашен:

$$CF_{4,5} = 4200 - 548{,}4 = 3651{,}6 \text{ тыс. руб./год}$$

Дисконтирующие множители приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 - Дисконтирующие множители

Год	Поток	Дисконт-фактор	Дисконтированный поток
0	-2500 (собств.)	1,0000	-2500,0
1	2370,8	0,8929	2116,0
2	2370,8	0,7972	1889,5
3	2370,8	0,7118	1687,5
4	3651,6	0,6355	2320,6
5	3651,6	0,5674	2072,0

Сумма дисконтированных потоков = 2116,0 + 1889,5 + 1687,5 + 2320,6 + 2072,0 = 10085,6 тыс. руб.

$$NPV = -2500 + 10085{,}6 = 7585{,}6 \text{ тыс. руб.}$$

$$IRR \approx 58\%$$

Сводные результаты сравнения ключевых показателей эффективности для двух моделей приведены в таблице 5.11.

Таблица 5.11 - Сравнение ключевых показателей эффективности

Показатель	Модель А (300 га) Сценарий 2 (частичный, свои средства)	Модель Б (5000 га) Сценарий 3 (полный, свои средства)	Модель Б (5000 га) Сценарий 3 (кредит, 50%)
Инвестиции, тыс. руб.	1800	5000	2500 (собств.)
Годовая экономия, тыс. руб.	1209,2	4200	4200
Чистый денежный поток (средний), тыс. руб./год	1039,4	3560	2370,8 (1–3 г.), 3651,6 (4–5 г.)
NPV, тыс. руб.	+1946,8	+7833,1	+7585,6
Внутренняя норма доходности (IRR), %	49,2%	65,4%	~58%
Дисконтированный срок окупаемости, лет	**2,06**	**1,64**	**1,8**
$\boldsymbol{K_{\text{экэ}}}$	**6,9**	**9,4**	**8,2**
$\boldsymbol{K_{\text{энэ БАС}}}$	**0,50**	**0,64**	**0,64**

Результаты по всем сценариям для двух модельных хозяйств представлены в таблицах 5.12–5.16.

Таблица 5.12 - Модель А (малое хозяйство 300 га)

Сценарий	Тип финансирования	Площадь обработки, га	Инвестиции, тыс. руб	Кэнэ	Кэкэ	Срок окупаемости, лет
1. Пилотный	Свои средства	30 (10%)	650	0,3	4,5	11,2
	С кредитом (50%)	30	325+кр	0,30	3,3	18,5
	Аутсорсинг	30	0	0,3	5,12	0,6
2. Частичный	Свои средства	150 (50%)	1,800	0,5	6,9	4,2
	С кредитом (50%)	150	900+кр	0,5	5,9	6,1
	Аутсорсинг	150	0	0,5	7,4	1,4
3. Полная интеграция	Свои средства	300 (100%)	5,000	0,6	7,6	4,2
	С кредитом (50%)	300	2,500+кр	0,6	6,4	6,5
	Аутсорсинг	300	0	0,6	8,1	2,5
4. Кооперативный	Свои средства	300	3,000	0,6	7,2	4,5
	С кредитом (50%)	300	1,500+кр	0,6	6,1	7,1
	Аутсорсинг	300	0	0,6	7,8	3,0

Таблица 5.13 - Модель Б (крупное хозяйство 5000 га)

Сценарий	Тип финансирования	Площадь обработки, га	Инвестиции, тыс. руб	Кэнэ	Кэкэ	Срок окупаемости, лет
1. Пилотный	Свои средства	500 (10%)	650	0,3	6,8	5,6
	С кредитом (50%)	500	325+кр	0,3	5,6	8,2
	Аутсорсинг	500	0	0,3	7,5	0,4
2. Частичный	Свои средства	2,500 (50%)	1,800	0,5	8,2	2,3
	С кредитом (50%)	2,500	900+кр	0,5	7,2	3,5
	Аутсорсинг	2,500	0	0,5	8,8	0,8
3. Полная интеграция	Свои средства	5,000 (100%)	5,000	0,6	9,4	4,2
	С кредитом (50%)	5,000	2,500+кр	0,6	8,2	1,64
	Аутсорсинг	5,000	0	0,6	9,9	2,5
4. Кооперативный	Свои средства	5,000	3,000	0,6	9,1	3,3
	С кредитом (50%)	5,000	1,500+кр	0,6	7,9	5,0
	Аутсорсинг	5,000	0	0,6	9,6	2,0

Таблица 5.14 - Сравнение оптимальных сценариев по моделям хозяйства

Критерий	Модель А (300 га)	Модель Б (5000 га)
Наиболее эффективный сценарий	Сценарий 3 (аутсорсинг)	Сценарий 3 (аутсорсинг)
Кэнэ максимальный	0,64	0,64
Кэкэ максимальный	8,15	9,90
Минимальный срок окупаемости	0,6 лет (Сц1 аутсорсинг)	0,4 лет (Сц1 аутсорсинг)
Наилучшее соотношение цена/качество	Сценарий 2 (аутсорсинг)	Сценарий 2 (аутсорсинг)
Рекомендуемый тип финансирования	Аутсорсинг	Аутсорсинг или свои средства
Порог рентабельности по площади	150 га	500 га
Эффект масштаба (Кэкэ/га)	0,027	0,00198

Таблица 5.15 - Влияние типа финансирования на эффективность (среднее по сценариям)

Тип хозяйства	Финансирование	Средний Кэнэ	Средний Кэкэ	ΔКэкэ от своих средств
Модель А (300 га)	Свои средства	0,51	6,57	–
	С кредитом	0,51	5,44	–1,13
	Аутсорсинг	0,51	7,13	+0.56
Модель В (5000 га)	Свои средства	0,51	8,42	–
	С кредитом	0,51	7,29	–1,13
	Аутсорсинг	0,51	8,93	+0.51

Таблица 5.16 - Сводные рекомендации по выбору сценария

Категория хозяйства	Площадь, га	Рекомендуемый сценарий	Тип финансирования	Ожидаемый К_экэ	Срок окупаемости
Мелкие	< 200	Сценарий 1 или 2	Аутсорсинг	5,0 – 7,5	0,5 – 3 лет
Средние	200 – 1000	Сценарий 2 или 4	Аутсорсинг	6,5 – 8,5	1 – 4 лет
Крупные	1000 – 5000	Сценарий 3	Свои средства или аутсорсинг	8,0 – 9,5	2 – 5 лет
Очень крупные	> 5000	Сценарий 3	Свои средства	9,0 – 10,0	3 – 6 лет

Коэффициент энергетической эффективность ($К_{энэ}$) не зависит от масштаба хозяйства, максимальное значение в сценарии 3 (0,64), минимальное в сценарии 1 (0,30). Коэффициент экономической эффективности ($К_{экэ}$) сильно зависит от масштаба, для 5000 га на 28% выше, чем для 300 га. Аутсорсинг повышает коэффициент экономической эффективности на 8–10%, кредит снижает на 17–20%.

Для любых хозяйств аутсорсинг дает максимальную эффективность. Для инвестиций в оборудование Сценарий 3 наиболее эффективен. Порог рентабельности 150 га для малых хозяйств, 500 га для частичного внедрения. Кредитное финансирование со ставкой 25% снижает эффективность ниже порога для малых хозяйств. Пилотные проекты (сценарий 1) не окупаются при использовании своих средств для малых хозяйств. Эффект масштаба ярко выражен, коэффициент экономической эффективности снижается при переходе от 300 га к 5000 га

5.2 Оценка повышения эффективности эксплуатации БАС на примере опытной станции Кубанского ГАУ

На примере опытной станции Кубанского ГАУ (150 га) провели оценку повышения эффективности эксплуатации БАС. Оценка проводится в два этапа, на первом этапе проводится актуализация и разработка технологических карт на выполнение операций. На втором этапе собираются входные данные о предприятии, типе средствах БАС и электротехнологий, выполняемой операции, сроках проведения работ, типе препаратов и метеоусловий, строиться схема загрузки парка БАС.

На примере типового малого хозяйства на 150 га, показаны сроки проведения работ по основным культурам с применением БАС (таблица 5.17). Примем, что половина земель, как правило, выделяется под пшеницу и ячмень.

Таблица 5.17 - Технологические операции по культурам

Культура	Дата	Фаза растения	Операции
Пшеница	24.10.2023		Сев
	22.04.2024	Выход в трубку	Обработка гербицидами
	24.05.2024	Начало выхода колоса	Обработка фунгицидами
	1.07.2024	Полная спелость	Уборка
Кукуруза	8.04.2024		Сев
	22.05.2024	3–6 листа	Обработка гербицидами
	4–9.09.2024		Уборка
Подсолнечник	17.04.2024		Сев
	23.05.2024	2–4 листа	Обработка гербицидами
	3.06.2024	4–8 листа	

Культура	Дата	Фаза растения	Операции
	20.06.2024	Бутонизация	Уборка
	5–9.09.2024		
Соя	19.04.2024		Сев
	22.05.2024	Три настоящих листа	Обработка гербицидами
	24.07.2024	Налив зерна, конец бутонизации	Обработка инсектицидами
	3.09.2024		Уборка

В результате исследования, получен годовой календарный план применения БАС на растениеводческих предприятиях АПК (рисунок 5.1, таблица 5.18).

Месяц / Культура	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Пшеница	М	Р	О	О	О	М				О Р	О Р	О
Ячмень	М	Р	О	О	О	М				О	О	О
Кукуруза					В	О	О Р	Д Р	Д			
Подсолнечник					В	О	О Р	Д Р	Д			
Соя						О	Р	Р	Д			
Рис					П	О	О			М	М	
Люцерна			П	П								

М – мониторинг; Р – разбрасывание, внесение сыпучих материалов; О – опрыскивание; В – оценка всходов Д – десикация; П – посев.

Рисунок 5.1 - Проводимы работы с БАС

Таблица 5.18 - Распределение площадей под культуры по предприятию с проводимыми операциями БАС

Культура	Площадь (примерно)	Операции с БАС (месяцы)
Пшеница	50 %	Янв (М), Фев (Р), Март (О), Апр (О), Май (О), Июнь (М), Окт (О, Р), Ноя (О, Р), Дек (О)
Ячмень	20 %	Янв (М), Фев (Р), Март (О), Апр (О), Май (О), Июнь (М), Окт (О), Ноя (О), Дек (О)
Кукуруза	10 %	Май (В), Июнь (О), Июль (О, Р), Авг (Д, Р), Сент (Д)
Подсолнечник	10 %	Май (В), Июнь (О), Июль (О, Р), Авг (Д, Р), Сент (Д)
Соя	10 %	Июнь (О), Июль (Р), Авг (Р), Сент (Д)

Упрощённо предположим, что каждая операция проводится на всей площади культуры в указанный период и примем 4 сценария для расчета: сценарий 1 (пилотный), только одна операция (например, мониторинг), α_τ = 0,3; сценарий 2 (частичное внедрение), мониторинг и обработки на части культур, α_τ = 0,8; сценарий 3 (полная интеграция), все операции (внесение удобрений, опрыскивание, мониторинг, десикация), α_τ = 1,0; сценарий 4 (традиционный), без применения БАС (контроль для сравнения), α_τ = 0.

Эксплуатационные затраты традиционной технологии $С_{эксп,трад}$ на примере обработки гербицидами площади 150 га при стоимости ГСМ 60 руб./л и норме расхода ГСМ 2 л/га составят:

$$С_{эксп,трад} = 150 \text{ га} \cdot 2 \text{ л/га} \cdot 60 \text{ руб./л} = 18000 \text{ руб./операция}$$

Для сценария 2 представим подробный расчет:

Оплата труда ($З_{ОП}$) составит: полная ставка оператора 600 000 руб, аналитика (0,5 ставки) 300 000 руб. Итого $З_{ОП}$ = 900 000 руб./год.

Энергозатраты ($З_{эл/зар}$) составят: общая площадь для обработки пшеница (75×2) + Ячмень (30×1) + Кукуруза (15×1) + Подсолнечник (15×1 + 15×1) + Соя (15×2) == 150 + 30 + 15 + 30 + 30 =255 га.

Расход электроэнергии составит:

0,2 кВт·ч/га·255 га = 51 кВт·ч.

При тарифе 8 руб./кВт·ч. получаем:

Зэл/зар = 51·8 =408 руб./год.

Обслуживание и ремонт ($З_{рем}$):

Замена АКБ: 50 000 / 2 = 25 000 руб./год.

Ремонт (винты, двигатели): 30 000 руб./год (рост износа).

Обновление ПО: 15 000 руб./год.

$З_{рем}$=25000+30000+15000=70 000 руб./год.

Амортизация БАС ($А_{БАС}$) составит:

Стоимость комплекта (2 дрона + зарядные станции): 2 800 000 руб.

Срок службы: 5 лет.

$$А_{БАС} = 2\ 800\ 000 / 5 = 560\ 000 \text{ руб./год}$$

Расходы на расходные материалы ($З_{мат}$):

$$З_{сум} = 900000 + 408 + 70000 + 560000 = 1530408 \text{ руб}$$

Применяя коэффициенты $\alpha_\tau = 0{,}8$ и $k_{риск} = 0{,}8$ получим:

$$С_{эксп,БАС} = 0{,}8 \cdot 0{,}8 \cdot 1530408 = 0{,}64 \cdot 1530408 = 979461 \text{ руб./год}$$

Потери продукции и качественные эффекты ($B_{кач}$) рассчитаем с учетом, что средняя урожайность – 45 ц/га и цена зерна – 1 500 руб./ц, коэффициент сохранности $\Delta\eta = 0{,}03$ (более точное выявление проблем) тогда:

$$B_{сохр} = 150 \cdot 45 \cdot 1500 \cdot 0{,}03 = 303750 \text{ руб}$$

Экономия от точного внесения СЗР ($B_{тз}$) может быть учтена с учетом, что при обработке с БАС по 7–ми операциям площадь обработок (суммарная) как в расчёте выше – 255 га, экономия препарата составит 0,2 л/га, при стоимости СЗР 1 500 руб./л. получим:

$$B_{тз} = 255 \cdot 0{,}2 \cdot 1500 = 76500 \text{ руб}$$

Экономия при десикации на ГСМ при обработке подсолнечника 15 га составит 1 800 руб.

Итого качественный эффект будет равен:

$$B_{кач} = 303750 + 76500 = 380250 \text{ руб./год}$$

Убыток от недоиспользования потенциала $У_{пр,БАС}$ рассчитаем при условии: Стоимость БАС ($Ц_{БАС}$) – 2 800 000 руб (DJI T40 и DJI Mavic 3 в комплекте со смесительным узлом. Ресурс батареи примем ($Р_{БАС}$) 2 000 ч. Нормативная наработка ($Н_н$) – 300 ч/год.

Фактическая норма работы ($Ф_н$) при опрыскивании тогда будет равна:

$$Ф_н = 255 \text{ га} \cdot 0{,}3 \text{ ч/га} = 76{,}5 \text{ ч.}$$

При мониторинге:

$$Ф_н = 150 \text{ га} \cdot 0{,}1 \text{ ч/га} \cdot 4 \text{ раза/год} = 60 \text{ ч.}$$

Итого $Ф_н$ = 136,5 ч/год, тогда $У_{пр,БАС}$ получим равным:

$$У_{пр,БАС} = \frac{2800000}{2000} \cdot (300 - 136{,}5) = 1400 \cdot 163{,}5 = 228900 \text{ руб}$$

Общее изменение затрат ΔД будут равны:

$$\Delta Д = 2340000 - [979461 + 380250 - 228900] = 1209189 \text{ руб}$$

Критерий экономической эффективности ($Э_{эф}$) равен:

$$Э_{эф} = \frac{1209189}{2800000} \cdot 100\% = 43{,}2\%$$

Проект эффективен, каждый рубль инвестиций приносит 0,43 рубля годовой экономии.

Произведем уточнение интегрального коэффициента $К_{экэ}$

$$К_{экэ} = 0{,}348 + 0{,}0975 + 0{,}0285 + 7{,}94 + 0{,}6 + 0{,}0492 + 0{,}0493 = 9{,}1125$$

Энергетическая эффективность ($К_{энэ}$) равна:

$$E_{\text{трад}} = 2035 \text{ МДж/га}$$

$$E_{\text{БАС}} = 250 \text{ МДж/га}$$

$$К_{энэ} = \frac{2035 - 250}{2035} = 0{,}877$$

Таблица 5.19 - Сводная таблица экономических показателей

Показатель	Сценарий 1 (пилотный	Сценарий 2 (частичный)	Сценарий 3 (полный)	Сценарий 4 (традиционный)
Инвестиции (I_0), руб	2 500 000	2 800 000	2 500 000	0
Затраты эксплуатационные ($С_{эксп}$), руб./год	399 665	979 461	1 332 216	2 340 000
Качественный эффект ($B_{кач}$), руб./год	15 000	380 250	213 750	0
Убыток от недозагрузки ($У_{пр}$), руб./год	210 000	228 900	187 500	0
Годовая экономия (ΔЗ), руб./год	–384 665 (убыток)	1 209 189	1 454 250	0 (база)
Экономическая эффективность ($Э_{эф}$), %	– 15,4% (убыток)	43,2%	58,2%	–
Простой срок окупаемости, лет	не окупается	~2,3 года	~1,7 года	–

Сценарий 1 (пилотный) – убыточен ($Э_{эф}$=−15,4%), так как затраты на покупку БАС есть, а выгоды минимальны, не рекомендуется как самостоятельная стратегия, только как демонстрационный проект.

Сценарий 2 (частичное внедрение) – эффективен ($Э_{эф} = 43{,}2\%$), окупаемость 2,3 года. Качественные эффекты максимальны среди всех вариантов ($B_{кач} = 380$ тыс. руб) за счёт обработки всех культур, оптимальный вариант для хозяйства 150 га, даёт максимальный прирост качества при приемлемых инвестициях. При полной покупке оборудования за кредитные средства под 15% годовых финансовая устойчивость оказывается на грани допустимого ($K_{уст} = 0{,}986$), предприятию потребуется либо использовать собственные средства (снижение нагрузки), брать кредит на льготных условиях (сельскохозяйственные программы), увеличивать загрузку оборудования (например, оказывать услуги соседним хозяйствам).

Сценарий 3 (полная интеграция) – наилучшая окупаемость – 1,7 года ($Э_{эф} = 58{,}2\%$). Требует полной замены парка и высокой квалификации персонала, сегодня технически ограничен из–за недостаточной грузоподъёмности БАС и больших норм внесения удобрений, основные работы сводятся к опрыскиванию. Для 150 га может быть избыточен (низкая загруженность).

Сценарий 4 (традиционный) – контрольный, скрытые потери от несохраненного урожая и перерасхода СЗР составляют 400–500 тыс. руб в год (не учтены в прямой себестоимости). Технологически устаревший вариант, ведёт к потере конкурентоспособности.

5.3 Выводы по главе

1. На основе расчетов методом чистой приведённой стоимости (NPV) для двух модельных предприятий (300 га и 5000 га) установлено, что эффективность внедрения БАС определяется масштабом производства и выбранным сценарием. Для малых хозяйств (до 300 га) наиболее эффективным является сценарий частичного внедрения с собственными средствами, срок окупаемости - 2,06 года. Для крупных хозяйств (более 5000 га) оптимальна полная интеграция, срок окупаемости - 1,64 года. Аутсорсинг обеспечивает положительный NPV при любых площадях, но не создаёт собственных активов. Кредитное финансирование (25%

годовых) снижает NPV на 30–40%, однако при льготных ставках (5–7%) становится сопоставимо с собственными средствами. Порог рентабельности составляет 150 га для малых и 500 га для крупных хозяйств. $K_{\text{экэ}}$ коррелирует с NPV ($R^2 = 0{,}89$), что подтверждает его пригодность для экспресс-оценки, но окончательное решение должно приниматься на основе дисконтированных критериев.

2. Для хозяйства площадью 150 га с применением классического метода экономической оценки установлено, что сценарий частичного внедрения (Сценарий 2) является наиболее эффективным, срок окупаемости - 3,30 года. Полная интеграция (Сценарий 3) при горизонте 5 лет экономически неэффективна из-за недостаточной загрузки оборудования (δ = 0,18–0,25); для достижения положительного NPV требуется увеличение горизонта до 6 лет. Пилотный проект убыточен при любых условиях и не рекомендуется к самостоятельной реализации. Ключевым фактором эффективности является коэффициент загрузки БАС: при увеличении δ с 0,18 до 0,8 удельные инвестиции снижаются с 24 000 до 3 000 руб./га. Основной вклад в формирование положительного денежного потока вносят качественные эффекты (сохранённый урожай, экономия СЗР и воды), которые полностью компенсируют высокие эксплуатационные затраты на этапе освоения технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Предложена комплексная система экономического и энергетического критериев оценки эффективности эксплуатации БАС, позволяющие связать между собой: параметры БАС, тип и качество технологической операции, экономические, инфраструктурные и энергетические показатели, экологический эффект. Предложен безразмерный коэффициент экономической эффективности, представляющий собой сумму частных коэффициентов: рентабельности инвестиций, устойчивости погашения долга, экономии водного ресурса, замещения топлива, производительности мониторинга, производительности внесения СЗР и удобрений, экологической эффективности. Введен безразмерный коэффициент энергетической эффективности, характеризующий относительное снижение удельных энергозатрат при замене отдельных технологий и позволяющий 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 учёт 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 учётом

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/см^2) и площади покрытия от высоты полёта (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 счёт 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. Созданная 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 растворам 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/px), параметрами съёмки (высота 1-150 м, перекрытия 60-90 %) объёмом 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 полётное задание по критериям минимизации времени обследования, 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 коэффициентов эффективности мониторинга: коэффициент экономической эффективности составит 3 - 5, энергетической 3-6. При применении специализированных средств и программного обеспечения диапазон изменится: для экономической составляющей – 8-10 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). Внедрение предложенных ПО, увеличивает коэффициенты: экономической эффективности на 0,95-1,25 (на 13,8%-15%); энергетической эффективности на 0,05-0,07 (на 5,8%-8,1%). Сокращение времени обработки данных в 2 раза 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. Разработано программное обеспечение для расчета параметров полетного задания БАС в различных технологических операциях. Несмотря на увеличение

инвестиции в части затрат на покупку ПО при внедрении на производстве будет обеспечен прирост коэффициента экономической эффективности на 0,8 (8,3%), энергетической эффективности на 0,03 (4,4%). Разработанная многофункциональная беспилотная летающая система для опрыскивания растений (Патенты 2789929, 2793489, 2688183, 2644472), 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% (Патенты 2634277, 2777466, 2643839). Снижение нормы расхода жидкости при опрыскивании с помощью БАС по сравнению с традиционной технологией увеличивает коэффициент экономии водного ресурса $K_{\text{водрес}}$ на 0,3. Снижение пестицидной нагрузки за счет лучшей растворимости препарата повышает коэффициент экологической эффективности $K_{\text{экол}}$ на 0,15. Общий прирост коэффициента экономической эффективности в результате внедрения электротехнологии может составить 0,85 (10,2%). Установлено снижение совокупных энергозатрат БАС $E_{\text{совБАС}}$ на 5%, что дает прирост коэффициента энергетической эффективности на 0,04 (5,4%).

10. Применение разработанной методологии с предлагаемыми способами и средствами позволяет получить прирост критерия экономической эффективности до 46,3%, что подтверждает высокую экономическую эффективность предлагаемого комплекса решений; а прирост критерия энергетической эффективности до 21,9%, что показывает перспективность применения БАС в цифровом земледелии. 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. На основе расчётов методом чистой приведённой 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 (сохранённый 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. Интегральный коэффициент $K_{\text{экэ}}$ 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. Методология подтверждает экономическую и ресурсную эффективность системного внедрения БАС.

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 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 объёмах 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 съёмки, 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.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агаев, Ф. Г. Исследование оптимальных режимов функционирования БАС в беспроводных сетях передачи информации / Ф. Г. Агаев, Х. Г. Асадов, П. Р. г. Зульфугарлы // Труды МАИ. – 2021. – № 119.

2. Актуальность применения беспилотных летательных аппаратов с беспроводным стандартом передачи энергии в сельском хозяйстве / А. А. Латышенок,
М. А. Привалов, Е. С. Семина, Н. М. Латышенок // Актуальные вопросы современной аграрной науки : материалы национальной студенческой научно–практической конференции, Рязань, 15 октября 2025 года. – Рязань : Рязанский государственный агротехнологический университет имени П. А. Костычева, 2025. – С. 146–153.

3. Алагозова, С. С. Экономическая и энергетическая оценка эффективности возделывания озимой пшеницы / С. С. Алагозова, Г. С. Мылтыкбаева // Вестник науки и творчества. – 2017. – № 1(13). – С. 6–9.

4. 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.

5. Анализ применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / Б. К. Салаев, А. А. Серегин, В. А. Эвиев [и др.] // Вестник аграрной науки Дона. – 2022. – Т. 15, № 4 (60). – С. 29–44.

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

7. Аналитический отчет по результатам исследования российского гражданского рынка беспилотных авиационных систем в 2024 году / Ассоциация «АЭРОНЕКСТ». – Москва, 2024. – 80 с.

8. Андреев, П. С. К вопросу выбора аккумуляторных батарей БЛА при условии групповой работы. – Текст : электронный / П. С. Андреев, А. И. Селин // Universum: технические науки : электронный научный журнал. – 2023. – № 6 (111).

9. Архипов, В. А. Движение аэрозольных частиц в потоке : учебное пособие / В. А. Архипов, А. С. Усанина ; Томский государственный университет. – Томск : Издательский дом Томского государственного университета, 2013. – 92 с. – ISBN 978–5–9462–1420–9. (pp. 40–54).

10. Асланова, А. Б. г. Оптимизация режимных показателей батарейных БАС с дифференциальным сбросом веса полезной нагрузки / А. Б. г. Асланова // Труды МАИ. – 2021. – № 119.

11. Асовский, В. П. Компьютерное моделирование авиационного опрыскивания при совершенствовании технологии авиационно–химических работ / В. П. Асовский, А. С. Кузьменко // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2021. – № 5 (222). – С. 20–29.

12. Асовский, В. П. Моделирование процессов авиационного опрыскивания с применением беспилотных воздушных судов / В. П. Асовский, А. С. Кузьменко // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении (КомТех–2022) : материалы Всероссийской научно–технической конференции с международным участием. В 2–х т. Таганрог, 08–10 июня 2022 года. – Таганрог : Южный федеральный университет, 2022. – С. 319–323.

13. Асовский, В. П. Моделирование процессов и показателей опрыскивания склонов беспилотными воздушными судами / В. П. Асовский, А. С. Кузьменко, А. В. Асовский // Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении КомТех–2023 : материалы Всероссийской научно–технической конференции с международным участием имени профессора О.Н. Пьявченко. В 2–х т. Таганрог, 07–09 июня 2023 года. Т. 1. – Таганрог : Южный федеральный университет, 2023. – С. 219–227.

14. Асовский, В. П. Особенности и перспективы выполнения авиационно–химических работ с использованием беспилотных воздушных судов / В. П. Асовский, А. С. Кузьменко // Перспективы использования инновационных форм удобрений, средств защиты и регуляторов роста растений в агротехнологиях сельскохозяйственных культур : материалы докладов участников 10–й научно–практической конференции, Анапа, 03–07 сентября 2018 года / под ред. В. Г. Сычева. – Анапа : ООО «Плодородие», 2018. – С. 13–19.

15. Асовский, В. П. Оценка особенностей формирования и влияния вихревого следа легких беспилотных мультикоптеров / В. П. Асовский, А. С. Кузьменко // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 49–59.

16. Асовский, В. П. Оценка показателей опрыскивания легким БАС / В. П. Асовский, А. А. Гусева, Н. В. Шарипова // Защита и карантин растений. – 2017. – № 7. – С. 42–45.

17. Асовский, В. П. Оценка показателей работ беспилотных мультикоптеров по внесению пестицидов и агрохимикатов / В. П. Асовский, А. С. Кузьменко, О. В. Худоленко // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2021. – Т. 15, № 3. – С. 55–62.

18. Асовский, В. П. Теория и практика авиационного распределения веществ / В. П. Асовский. – Москва : Воздушный транспорт, 2008. – 580 с.

19. Башилов, А. М. Аэромобильные устройства в технологиях пастбищного животноводства / А. М. Башилов, В. А. Королев // Вестник аграрной науки Дона. – 2023. – Т. 16, № 1 (61). – С. 54–65.

20. Башилов, А. М. Беспилотные технологии в системах аграрного производства / А. М. Башилов, В. А. Королев // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 5 (144). – С. 43–56.

21. Башилов, А. М. Наземные и воздушные агротехнологические агрегаты с бесконтактным электропитанием и управлением / А. М. Башилов, В. А. Королев // Вестник аграрной науки Дона. – 2024. – Т. 17, № 1(65). – С. 30–38.

22. Башилов, А. М. От иерархического управления агропредприятием к групповому сетецентрическому / А. М. Башилов, В. А. Королев // Вестник НГИЭИ. – 2023. – № 8(147). – С. 74–85.

23. Беспилотные летательные аппараты для внесения пестицидов и удобрений в системе точного земледелия. – Текст : непосредственный / И. Г. Смирнов,
Л. А. Марченко, Г. И. Личман, Т. В. Мочкова, А. Ю. Спиридонов // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 3. – С. 10–16.

24. Бетелин, В. Б. Проблемы и перспективы формирования цифровой экономики в России / В. Б. Бетелин // Вестник Российской академии наук. – 2018. – Т. 88, № 1. – С. 3–9.

25. Борисов, А. С. О распределении заряженного аэрозоля в воздушных турбулентных струях. – Текст : непосредственный / А. С. Борисов, И. О. Голосной // Математическое моделирование. – 1997. – Т. 9, № 7. – С. 100–112.

26. Бронников, А. В. Использование беспилотных авиационных систем в растениеводстве : методические рекомендации / А. В. Бронников. – Москва : ФГБНУ «Росинформагро тех», 2024. – 100 с.

27. Букатов, Д. А. Беспилотные энергосиловые агрегаты на малых фермерских участках / Д. А. Букатов, А. Н. Бачурин, В. М. Корнюшин // Инженерное обеспечение инновационного развития АПК в условиях современных вызовов : материалы Всероссийской научно–практической конференции, посвященной 75–летнему юбилею инженерного факультета ФГБОУ ВО РГАТУ, Рязань, 29 мая 2025 года. – Рязань : Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева, 2025. – С. 143–151.

28. Вишневский, В. М. Расчет необходимой мощности для функционирования привязной беспилотной платформы в условиях турбулентной атмосферы. – Текст : непосредственный / В. М. Вишневский, А. М. Ширванян, Н. Н. Бряшко // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2020. – Вып. 3. – С. 71–84. (pp. 76–82).

29. Водянников, В. Т. Экономическая оценка технических средств и инженерно–технических решений в сельском хозяйстве / В. Т. Водянников. – Санкт–Петербург : Лань, 2022. – 300 с. – ISBN 978–5–507–44262–1.

30. Воронков, И. В. Разработка методов и аппаратно–программных средств автоматизированного мониторинга и контроля выполнения посевных работ : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Воронков Илья Владимирович ; (место защиты : ФГБНУ «Росинформагротех»). – Москва, 2017. – 150 с. (pp. 56, 57).

31. Генин, В. А. Опыт использования мультиспектральных космических снимков для дифференцированного внесения удобрений / В. А. Генин, Н. В. Клебанович // Геоматика. – 2016. – № 2. – С. 26–31.

32. Горбунов, А. А. Влияние метеорологических факторов на применение и безопасность полета беспилотных летательных аппаратов с бортовым ретранслятором радиосигнала / А. А. Горбунов, А. Ф. Галимов // Научно–аналитический журнал «Вестник Санкт–Петербургского университета государственной противопожарной службы МЧС России». – 2016. – № 2. – С. 7–15.

33. ГОСТ 14630–80. Оросители водяные спринклерные и дренчерные. Общие технические условия: межгосударственный стандарт. – Дата введения 1981–01–01. – Москва : Изд–во стандартов, 1986. – 12 с.

34. ГОСТ 20915–2011. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний : межгосударственный стандарт. – Дата введения 2013–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2011. – 28 с.

35. ГОСТ 24055–2016. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно–технологической оценки : межгосударственный стандарт. – Дата введения 2018–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 29 с.

36. ГОСТ 26025–83. Машины и тракторы сельскохозяйственные и лесные. Методы измерения конструктивных параметров : государственный стандарт Союза ССР. – Дата введения 1984–01–01. – Москва : Изд–во стандартов, 1984. – 8 с.

37. ГОСТ 28714–2007. Машины для внесения твердых минеральных удобрений. Методы испытаний : межгосударственный стандарт. – Дата введения 2009–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2007. – 40 с.

38. ГОСТ 34393–2018. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 7 декабря 2018 г. № 1081–ст. – Дата введения 2019–09–01. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 17 с.

39. ГОСТ 34630–2019. Техника сельскохозяйственная. Машины для защиты растений. Опрыскиватели. Методы испытаний : межгосударственный стандарт. – Дата введения 2021–03–15. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 44 с.

40. ГОСТ 34631–2019. Техника сельскохозяйственная. Методы энергетической оценки : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 11 августа 2020 г. № 479–ст. – Дата введения 2021–03–15. – Москва : Стандартинформ, 2020. – 13 с.

41. ГОСТ ISO 4254–6–2012. Машины сельскохозяйственные. Требования безопасности. Ч. 6. Опрыскиватели и машины для внесения жидких удобрений : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06 сентября 2013 г. № 952–ст. – Дата введения 2014–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 20 с.

42. ГОСТ ISO 5681–2012. Оборудование для защиты растений. Термины и определения : межгосударственный стандарт : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 октября 2013 г. № 1147–ст. – Дата введения 2014–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 16 с.

43. ГОСТ ИСО 5682–2–2004. Оборудование для защиты растений. Оборудование распылительное. Ч. 2. Методы испытаний гидравлических распылителей : межгосударственный стандарт : введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации с 1 января 2008 г. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 12 с.

44. ГОСТ Р 52778–2007. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы эксплуатационно–технологической оценки : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 ноября 2007 г. № 301–ст. – Дата введения 2008–07–01. – Москва : Стандартинформ, 2008. – 24 с.

45. ГОСТ Р 53053–2008. Машины для защиты растений. Опрыскиватели. Методы испытаний : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2008 г. № 434–ст. – Дата введения 2009–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 32 с.

46. ГОСТ Р 53057–2008. Машины сельскохозяйственные. Методы оценки конкурентоспособности : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 декабря 2008 г. № 434–ст. – Дата введения 2009–01–01. – Москва : Стандартинформ, 2009. – 11 с.

47. Гревцов, Н. М. Подготовка и выполнение полета квадрокоптера в городе / Н. М. Гревцов, Г. А. Лазурин, Р. М. Мурзагалин // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. – 2021. – № 3. – С. 154–167. – DOI 10.31857/S0002338821030069.

48. Двойнова, Н. Ф. Определение эффективности использования средств механизации в технологии возделывания сельскохозяйственных культур. – Текст : непосредственный / Н. Ф. Двойнова // Дальневосточный аграрный вестник. – 2018. – № 2 (46). – С. 152–159. (pp. 155–157).

49. Джавадов, Н. Г. Оптимизация применения гибридных мультироторных дронов для исследования атмосферы в режиме вертикального взлета / Н. Г. Джавадов, А. Б. г. Асланова // Труды МАИ. – 2022. – № 126.

50. Долгосрочная стратегия развития зернового комплекса Российской Федерации до 2035 года. – Москва : Росинформагротех, 2019. – 114 с.

51. Еремочкин, С. Ю. Методология анализа и повышения энергоэффективности электроприводов сложных систем электрифицированных

машин объектов АПК : дис. … д–ра техн. наук : 4.3.2. / Еремочкин Сергей Юрьевич ; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2025. – 376 с.

52. Журавлев, С. Ю. Методика расчета энергетической эффективности использования мобильных машинно–тракторных агрегатов / С. Ю. Журавлев // Вестник КрасГАУ. – 2013. – № 8 (83). – С. 142–151.

53. Захарова, Н. И. Развитие методов и технических средств аэрофотосъемки сельскохозяйственных угодий с помощью беспилотных воздушных судов : дис. … канд. техн. наук : 4.3.1., 5.6.6. / Захарова Наталья Ивановна ; Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ. – Москва, 2024. – 215 с.

54. Защита растений от болезней : учебник. – Текст : непосредственный / В. А. Шкаликов, О. О. Белошапкина, Д. Д. Букреев [и др.] ; под ред. д–ра биол. наук, проф. В. А. Шкаликова. – 3–е изд., исправ. и доп. – Москва : КолосС, 2010. – 404 с., (16) л. ил. : ил. – (Учебники и учебные пособия для студентов высших учебных заведений). – ISBN 978–5–9532–0767–6. (pp. 132–137).

55. Игнаткин, Ю. М. Исследование аэродинамических характеристик несущего винта вертолета методом CFD / Ю. М. Игнаткин, С. Г. Константинов // Труды МАИ. – 2012. – № 57. – С. 3.

56. Инновационные электротехнологии и электрооборудование в АПК / С. В. Оськин, Д. С. Цокур, С. А. Николаенко [и др.] // Новые технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности с использованием электрофизических факторов и озона : материалы XII Международной научно–практической конференции, Ставрополь, 25–26 мая 2018 года. Т. 3. – Ставрополь : Ставропольский государственный аграрный университет, 2018. – С. 74–79.

57. Инновационный подход к автоматизированной фотоактивации посевных площадей посредством БАС с целью стимуляции роста культур / Н. Н. Севостьянова, И. В. Лебедев, В. В. Лебедева, И. В. Ватаманюк // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20, № 6. – С. 1395–1417. – DOI 10.15622/ia.20.6.8.

58. Исмаилов, К. К. Определение аэродинамических характеристик беспилотного летательного аппарата самолетного типа аналитическими методами /

К. К. Исмаилов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2022. – № 78. – С. 112–124.

59. Использование энергетического показателя при оценке способов предпосевной обработке семенного материала / М. В. Шевченко, С. В. Щитов, Е. Е. Кузнецов, С. Н. Воякин // АгроЭкоИнфо. – 2022. – № 1 (49).

60. Исследование работоспособности электрифицированного оборудования, применяемого в сельском хозяйстве / П. Ю. Сиротин, А. В. Бирюков, В. В. Буданов, Д. Е. Каширин // Научно–исследовательские решения высшей школы : материалы студенческой научной конференции, 26 декабря 2023 года, Рязань, 26 декабря 2023 года. – Рязань : Рязанский государственный агротехнологический университет, 2023. – С. 53–54.

61. Исследование характеристик БАС самолетного типа при мониторинге сельскохозяйственных земель / С. В. Оськин, Д. С. Цокур, Е. В. Бондарчук, А. С. Оськин // Сельский механизатор. – 2025. – № 5. – С. 15–17.

62. Исследование эволюции профиля ветра над подстилающей поверхностью / М. А. Кудров, К. А. Зудов, М. А. Юдин, Ю. Э. Харчилава // Труды МАИ. – 2015. – № 83. – С. 1.

63. К вопросу снижения энергетических затрат на передвижение широкозахватных дождевальных машин / А. И. Рязанцев, Е. Ю. Евсеев, В. С. Травкин [и др.] // Международный журнал прикладных наук и технологий Integral. – 2025. – № 3. – С. 16–31.

64. Капелько, К. В. Алгоритм оптимизации параметров комбинированной системы электроснабжения электрических беспилотных летательных аппаратов. – Текст : непосредственный / К. В. Капелько, Э. Ю. Хохулин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2022. – Т. 28, № 1. – С. 46–54.

65. Катаев, М. Ю. Анализ практических возможностей применения беспилотных летательных аппаратов в сельском хозяйстве / М. Ю. Катаев, О. А. Пасько, Е. Ю. Карташов // Вестник КрасГАУ. – 2023. – № 1(190). – С. 54–62.

66. Компьютерное моделирование на базе Comsol Multiphysics для прогнозирования состояний электроустановок / Г. М. Оськина, Н. С. Баракин, В. А. Дидыч [и др.] // Сельский механизатор. – 2021. – № 6. – С. 12–14.

67. Корреляционные зависимости между вегетационными индексами, урожаем зерна и оптическими характеристиками листьев пшеницы при разном содержании в почве азота и густоте посева / В. П. Якушев, Е. В. Канаш, Д. В. Русаков [и др.] // Сельскохозяйственная биология. – 2022. – Т. 57, № 1. – С. 98–112.

68. Костин, А. С. Анализ рынка беспилотных летательных аппаратов в России и мире. – Текст : непосредственный / А. С. Костин, Н. В. Богатов // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: системный анализ и логистика : материалы I Международной научной конференции, 14–22 апреля 2020 г. – Санкт–Петербург, 2020. – С. 125–130.

69. Костюк, А. С. Особенности аэрофотосъемки со сверхлегких беспилотных летательных аппаратов / А. С. Костюк // Омский научный вестник. – 2011. – № 1 (104). – С. 236–240.

70. Костюк, А. С. Расчет параметров и оценка качества аэрофотосъемки с БАС / А. С. Костюк // Гео–Сибирь. – 2010. – Т. 4, № 1. – С. 83–87.

71. Котов, Г. В. Влияние шероховатости поверхности на распространение примеси в атмосфере / Г. В. Котов, А. Д. Булва // Вестник Командно–инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2012. – № 2 (16). – URL : https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie–sherohovatosti–poverhnosti–na–rasprostranenie–primesi–v–atmosfere.

72. Ксенз, А. Я. Совершенствование технологии и оборудования для опрыскивания сельскохозяйственных культур с применением электризации жидкостно–воздушной смеси : автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Ксенз Алексей Яковлевич ; Северо–Кавказский научно–исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства. – Краснодар, 2015. – 24 с.

73. Кузнецова, О. А. Улучшение технологических параметров мобильных энергетических средств за счет повышения продольно–поперечной устойчивости : дис. … канд. техн. наук : 05.20.01 / Кузнецова Ольга Александровна ; Дальневосточный государственный аграрный университет. – Благовещенск, 2020. – 177 с.

74. Кузьменко, А. С. Методы, технологии и средства повышения качества и эффективности авиационно–химических работ : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.14 /

Кузьменко Алла Сергеевна ; (место защиты : ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»). – Таганрог, 2019. – 204 с. (pp. 71–75).

75. Курбанов, Р. К. Развитие беспилотных авиационных систем в сельскохозяйственных технологиях : автореф. дис. ... д–ра техн. наук : 4.3.1., 5.6.6. / Курбанов Рашид Курбанович. – Москва, 2025. – 47 с. (р. 16–21).

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

77. 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.

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

79. Курченко, Н. Ю. Критерии и факторы для внедрения БАС в АПК / Н. Ю. Курченко // Сборник статей по материалам ежегодной научно–практической конференции преподавателей по итогам НИР за 2024 год, Краснодар, 05 февраля 2025 года. – Краснодар : КубГАУ, 2025. – С. 830–831.

80. 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.

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

82. 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.

83. Курченко, Н. Ю. Нормативно–правовая база использования беспилотных авиационных систем / Н. Ю. Курченко, Е. В. Труфляк. – Краснодар : КубГАУ, 2021. – 56 с.

84. Курченко, Н. Ю. Параметры и режимы электроактиватора для приготовления рабочего состава гербицидов : дис. … канд. техн. наук : 05.20.02 / Курченко Николай Юрьевич. – Краснодар, 2015. – 151 с.

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

86. Курченко, Н. Ю. Разработка программного обеспечения для обработки снимков, полученных с беспилотных летательных аппаратов / Н.Ю. Курченко, Я. А. Ильченко, Е. В. Труфляк. – Краснодар : КубГАУ, 2019. – 60 с.

87. 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.

88. 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.

89. 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 Международной научно–практической конференции в рамках Десятилетия науки и технологий в РФ, Воронеж, 15–16 октября 2025 года. – Воронеж : Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I, 2025. – С. 110–112.

90. 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.

91. Лебедев, И. М. Беспилотники в сельском хозяйстве: преимущества и вызовы / И. М. Лебедев, А. А. Соколов, К. Д. Сазонкин // Инновации в сельском хозяйстве и экологии : материалы II Международной научно–практической конференции, Рязань, 21 сентября 2023 года. – Рязань : Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2023. – С. 177–180.

92. Лекомцев, П. Л. Электроаэрозольные технологии в сельскохозяйственном производстве : автореф. дис. … д–ра техн. наук : 05.20.02 / Лекомцев Петр Леонидович ; Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина. – Москва, 2007. – 34 с.

93. Маркевич, А. Е. Основы эффективного применения пестицидов: справочник в вопросах и ответах по механизации и контролю качества применения пестицидов в сельском хозяйстве / А. Е. Маркевич, Ю. Н. Немировец. – Горки : Учреждение образования «Могилевский государственный учебный центр подготовки, повышения квалификации, переподготовки кадров, консультирования и аграрной реформы», 2004. – 60 с.

94. Мартинез Леон, А. С. Модели и алгоритмы автономного управления мониторингом прибрежных территорий с помощью малогабаритного беспилотного летательного комплекса : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.3.1. / Мартинез Леон Андрес Сантьяго. – Курск, 2025. – 20 с.

95. Масштабируемый потенциал информационного обеспечения современного земледелия / В. П. Якушев, В. В. Якушев, А. Ф. Петрушин [и др.] // Земледелие. – 2024. – № 8. – С. 3–8.

96. Матвеев, Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы : учебник / Л. Т. Матвеев. – 2–е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1984. – 751 с.

97. Матвеев, Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев. – Ленинград : Гидрометеорологическое изд., 1965. – 876 с.

98. Махонин, А. А. Анализ энергопотребления беспилотного летательного аппарата малых размеров / А. А. Махонин, М. А. Л. Аль–Духэйдахави, Р. Д. С. Аль–

Карави // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2021. – № 3. – С. 1–9.

99. Методика учета влияния метеорологических факторов на эффективность применения беспилотных летательных аппаратов на основе системного анализа / И. Е. Кузнецов, А. В. Мельников, Е. А. Рогозин, О. В. Страшко // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2018. – Т. 45, № 2. – С. 125–139.

100. Мешик, О. П. Проблемы оценки параметра шероховатости подстилающей земной поверхности / О. П. Мешик, А. С. Протасевич // Актуальные научно–технические и экологические проблемы сохранения среды обитания. ICEP – 2023 : сборник научных статей Международной научно–практической конференции «Водохозяйственное строительство и охрана окружающей среды», посвященной памяти доцента кафедры природообустройства, кандидата географических наук, доцента Шпока Ирины Николаевны, Брест, 16–17 октября 2023 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет ; под ред. А. А. Волчека [и др.]. – Брест : БрГТУ, 2023. – С. 58–66.

101. Мифтахов, И. Р. Разработка диагностической платформы на базе БПЛА для определения заболеваний растений на основе глубокого обучения : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 4.3.1. / Мифтахов Ильнур Ринатович. – Уфа, 2025. – 20 с.

102. Михайлов, В. В. Критерии эффективности беспилотных летательных аппаратов в решении задач мониторинга окружающей среды / В. В. Михайлов, А. В. Самсонов // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2013. – № 1–1 (2). – С. 365–369.

103. Млявая, Г. В. Влияние параметров шероховатости подстилающей поверхности на скорость ветра / Г. В. Млявая // Buletinul AŞM. Ştiinţele vieţii. – 2014. – № 2 (323). – С. 181–187.

104. Мочулаев, В. Е. Оценка стоимости производства зерновых культур на основе энергетического подхода. – Текст : непосредственный / В. Е. Мочулаев // Молодой ученый. – 2018. – № 21 (207). – С. 280–283.

105. Мясников, М. И. Математическая модель для расчета летно–технических характеристик электрических винтокрылых летательных аппаратов для целей городской аэромобильности / М. И. Мясников, И. Р. Ильин // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2023. – Т. 26, № 4. – С. 93–111.

106. 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 : сборник статей по материалам XII Международной научно–практической конференции, Краснодар, 16–20 июня 2025 года. – Краснодар : КубГАУ, 2025. – С. 293–295.

107. Научно–обоснованный прогноз развития точного земледелия в России / Е. В. Рудой, М. С. Петухова, С. В. Рюмкин [и др.]. – Новосибирск : Золотой колос, 2021. – 138 с. – ISBN 978–5–94477–295–4.

108. Никитин, В. Н. Оценка экономической эффективности использования беспилотных аэрофотосъемочных комплексов / В. Н. Никитин, Д. Н. Раков // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2013. – № 4 (24). – С. 48–56.

109. Об определении функциональных характеристик (потребительских свойств) и эффективности сельскохозяйственной техники и оборудования : постановление Правительства Российской Федерации от 1 августа 2016 г. № 740.

110. Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла» : Приказ Ростехнадзора от 16.11.2017 № 479.

111. Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух» : Приказ Ростехнадзора от 30.08.2021 № 288.

112. Определение энергетических затрат на работу машинно–тракторных агрегатов. – Текст : непосредственный / А. М. Карпов, П. В. Сенин, Т. В. Василькина, Д. Карпов // Вестник Мордовского университета. – 1999. – № 1/2. – С. 120–125.

113. Опрыскивание от А до Я. – 3–е изд. «Теория и практика опрыскивания» [Электронный ресурс]. – URL : https://www.lechler.com/fileadmin/media/russian/pdf/agriculture/lechler_agrar_grundwissen_spruehen_2021_ru.pdf.

114. Оптимальный уровень затрат совокупной энергии для максимального урожая озимой пшеницы / Г. Г. Маслов, Е. М. Юдина, Н. В. Малашихин, И. В. Вульшинская // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – № 5 (91). – С. 121–125.

115. 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.

116. 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.

117. Оськин, С. В. Модернизация непроточных диафрагменных электролизеров воды / С. В. Оськин, Д. С. Цокур // Сельский механизатор. – 2025. – № 7. – С. 19–21.

118. 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.

119. 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.

120. Оськин, С. В. Технико–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.

121. 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.

122. Панков, П. Д. Автоматизация процесса дозировки удобрений на полях с применением датчиков влажности почвы / П. Д. Панков // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. – 2025. – № 2 (24). – С. 56–62.

123. Панков, П. Д. Анализ урожайности зерновых культур методами дистанционного зондирования земли / П. Д. Панков // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. – 2025. – № 3 (25). – С. 79–85.

124. Панкратов, В. А. Методы кластеризации для выявления зон однородности по данным дистанционного зондирования Земли / В. А. Панкратов, А. В. Смахтина, В. В. Якушев // Таврический вестник аграрной науки. – 2025. – № 4 (44). – С. 159–175.

125. 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.

126. Патент № 2634277 C Российская Федерация, МПК A01M 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». – 8 с.

127. Патент № 2643839 C1 Российская Федерация, МПК A01C 7/00, A01C 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». – 8 с.

128. Патент № 2644472 C1 Российская Федерация, МПК C02F 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». – 11 с.

129. Патент № 2688183 C1 Российская Федерация, МПК C25B 9/08, C25B 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». – 14 с.

130. Патент № 2694502 C1 Российская Федерация, МПК A01M 9/00, A01C 15/00, B64D 1/16. Способ внесения сыпучих средств защиты растений и комплекс для его осуществления : № 2018118928 : заявл. 22.05.2018 : опубл. 15.07.2019 / Птицын В. Н. – 14 с.

131. Патент № 2775478 C1 Российская Федерация, МПК H02K 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., Цокур Д. С. [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 18 с.

132. Патент № 2777466 C1 Российская Федерация, МПК A01P 13/00, A01N 33/08, A01N 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». – 11 с.

133. Патент № 2789929 C1 Российская Федерация, МПК B64D 1/18, B64C 27/08, B64C 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». – 15 с.

134. Патент № 2793489 C1 Российская Федерация, МПК B64D 1/18, B64C 27/08, B64C 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». – 18 с.

135. Патент № 2808008 C1 Российская Федерация, МПК B64U 101/45, B64U 10/10, B64D 1/18. Беспилотный летательный аппарат для внесения пестицидов в промышленном садоводстве и питомниководстве : № 2023113348 : заявл. 23.05.2023 : опубл. 21.11.2023 / Марченко Л. А., Смирнов И. Г. , Спиридонов А. Ю. ; заявитель федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». – 14 с.

136. Патент № 2808295 C1 Российская Федерация, МПК B64U 101/45, B64U 10/10, B64U 10/20. Беспилотный летательный аппарат для обработки пестицидами пропашных культур : № 2023114329 : заявл. 31.05.2023 : опубл. 28.11.2023 / Марченко Л. А., Смирнов И. Г., Спиридонов А. Ю. ; заявитель федеральное

государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». – 18 с.

137. Патент № 2830613 C1 Российская Федерация, МПК B64U 101/40, B64D 1/16, A01M 9/00. Способ внесения средств биологической защиты растений в виде энтомофагов и устройство дозирования для его осуществления : № 2024106728 : заявл. 14.03.2024 : опубл. 22.11.2024 / Птицын В. Н. – 18 с.

138. Патент № 2848843 C1 Российская Федерация, МПК B64D 1/10, B64U 101/40. Система быстросъемного крепления целевой нагрузки для беспилотной авиационной системы : заявл. 10.04.2025 : опубл. 21.10.2025 / Немешаев А. Ю., Птицын В. Н. ; заявитель общество с ограниченной ответственностью «Конструкторское бюро № 9». – 15 с.

139. Патент на полезную модель № 18148 U1 Российская Федерация, МПК B05B 3/00. Распылитель жидкости вращающийся (варианты) : № 2000126059/20 : заявл. 17.10.2000 : опубл. 27.05.2001 / Шалаев В. С., Парменов Ж. В. , Шалаев А. В. ; заявитель общество с ограниченной ответственностью «Научно–производственное предприятие «Шахтпожсервис». – 8 с.

140. Патент на полезную модель № 218329 U1 Российская Федерация, МПК C02F 1/461, C25B 9/17. Проточный бездиафрагменный электролизер воды : № 2022129907 : заявл. 17.11.2022 : опубл. 22.05.2023 / Оськин С. В., Оськин А. С., Овсянников Д. А. [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина». – 10 с.

141. Патент на полезную модель № 223313 U1 Российская Федерация, МПК G01N 1/22. Пробоотборник воздуха : № 2023126835 : заявл. 19.10.2023 : опубл. 13.02.2024 / Гасиян К. Э., Пономарев А. В., Кремнева О. Ю. [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологической защиты растений». – 10 с.

142. Патент на полезную модель RU 18148 U1, МПК B05B 3/12. Распылитель жидкости вращающийся : № 99126135/14 ; заявл. 14.12.1999 ; опубл. 27.05.2001 / Кузнецов В. Г. – 5 с.

143. Петров, А. А. Цифровая экономика: вызов России на глобальных рынках / А. А. Петров // Торговая политика. – 2018. – № 1(13). – С. 44–75.

144. Повышение энергоэффективности дронов в сельскохозяйственном производстве / А. А. Симдянкин, С. Н. Борычев, И. А. Успенский [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2022. – № 1(65). – С. 380–390.

145. Повышение эффективности опрыскивания сельскохозяйственных культур / А. В. Линенко, В. В. Лукьянов, А. И. Азнагулов [и др.] // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2022. – № 3 (95). – С. 151–155.

146. Применение бесколлекторных двигателей постоянного тока в сельскохозяйственной технике / А. В. Линенко, П. Л. Лекомцев, В. В. Лукьянов, А. И. Азнагулов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2025. – № 1 (73). – С. 142–147.

147. Применение беспилотников при опрыскивании сельскохозяйственных культур / М. Д. Майоров, А. А. Кунцевич, А. А. Соколов, М. В. Евсенина // Инновации в сельском хозяйстве и экологии : материалы III Международной научно–практической конференции, Рязань, 15 января 2025 года. – Рязань : Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2025. – С. 253–257.

148. Применение гиперспектральных данных дистанционного зондирования и методов геостатистики в задаче управления азотным режимом зерновых культур / В. П. Якушев, О. А. Митрофанова, В. М. Буре [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 5. – С. 129–144.

149. Применение устройства электрозарядки капель при опрыскивании / А. В. Линенко, В. В. Лукьянов, А. И. Азнагулов, В. Г. Байназаров // Вестник Курганской ГСХА. – 2023. – № 2 (46). – С. 78–84.

150. 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.

151. Протасевич, А. С. Расчет скорости ветра в зависимости от высоты для различных классов шероховатости поверхности / А. С. Протасевич ; науч. рук. О. П. Мешик // Современные проблемы природопользования и природообустройства : сборник тезисов докладов Международной научно–практической конференции молодых ученых, посвященной 50–летию кафедры природообустройства, Брест, 6–7 октября 2022 г. / Министерство образования Республики Беларусь, Брестский государственный технический университет, Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, Брестский областной комитет природных ресурсов и охраны окружающей среды ; редкол. А. А. Волчек [и др.] ; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Мешик. – Брест : БрГТУ, 2022. – С. 84.

152. Развитие беспилотных авиационных систем в сельскохозяйственных технологиях : дис. … д–ра техн. наук : 4.3.1., 5.6.6. / Курбанов Рашид Курбанович ; науч. консультант Ценч Юлия Сергеевна. – Москва, 2025. – 456 с. : ил.

153. Разработка перспективного метода опрыскивания для производства гибридных семян кукурузы / В. М. Шуганов, А. М. Лешкенов, А. Х. Шогенов, З. Ю. Кантиев // Известия Кабардино–Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 6 (110). – С. 236–248.

154. 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.

155. Ревякин, Е. Л. Машины для химической защиты растений в инновационных технологиях : научно–аналитический обзор. – Текст : непосредственный / Е. Л. Ревякин, Н. Н. Краховецкий. – Москва : ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 124 с. – ISBN 978–5–7637–0784–4. (р. 24–42).

156. Романова, Л. В. Внедрение инструментов точного земледелия на сельскохозяйственных предприятиях / Л. В. Романова, И. Г. Шашкова, А. А. Соснина // Финансовый менеджмент. – 2025. – № 6. – С. 294–301.

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

158. Сапожникова, С. А. Микроклимат и местный климат : учебное пособие для гидрометеорологических институтов и университетов / С. А. Сапожникова. – Ленинград : Гидрометеорологическое издательство, 1950. – 242 с.

159. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024680874 Российская Федерация. Программный комплекс для распознавания и подсчета спор возбудителей болезней озимой пшеницы по изображениям, полученным с помощью световой микроскопии : № 2024669967 : заявл. 28.08.2024 : опубл. 03.09.2024 / Щербань П. С., Пеклич А. С., Кремнева О. Ю. [и др.] ; заявитель федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологической защиты растений». – 12 с.

160. Севостьянова, Н. Н. Лазерное излучение как инструмент стимуляции роста растений / Н. Н. Севостьянова, А. П. Янин, И. В. Лебедев // Теория и практика мировой науки. – 2021. – № 8. – С. 29–33.

161. Система земледелия Краснодарского края на агроландшафтной основе : рекомендации / А. Н. Коробка, С. Ю. Орленко, Е. В. Алексеенко [и др.] ; под ред. А. Н. Коробки, А. И. Трубилина, В. М. Лукомца. – Краснодар, 2015. – 352 с.

162. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85 (с изм. № 1–6) : свод правил : утвержден и введен в действие приказом Министерства строительства и жилищно–коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 декабря 2016 г. № 891/пр. – Дата введения 2017–06–04. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 95 с.

163. Спиридонов, Ю. Я. Развитие отечественной гербологии на современном этапе / Ю. Я. Спиридонова, В. Г. Шестаков. – Москва : ВНИИ Фитопатологи : Печатный город, 2013. – 426 с.

164. Способ выявления информативных спектральных каналов для определения уровня серы в посеве пшеницы по данным дистанционного зондирования / Д. И. Бикбулатов, В. П. Якушев, Я. Б. Панкратова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2025. – Т. 22, № 6. – С. 204–213.

165. 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 честолюбивая интеллектуальная молодежь сельскому хозяйству. – 2022. – № 1 (12). – С. 5–14.

166. Стимуляция вегетирующих растений лазерным излучением (с применением БАС) / Н. Н. Севостянова, М. Г. Даниловских, О. Ю. Трезорова [и др.] // Современные тенденции в научном и кадровом обеспечении АПК : материалы Всероссийской научно–практической конференции с международным участием, Великий Новгород, 28–29 ноября 2019 года. – Великий Новгород : Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, 2020. – С. 184–188.

167. СТО АИСТ 2.8–2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Надежность. Методы оценки показателей : стандарт организации. – Дата введения 2010–12–01. – [Б. м.] : АИСТ, 2010. – 36 с.

168. СТО АИСТ 6.2–2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Опрыскиватели. Надежность. Классификация отказов по группам сложности : стандарт организации. – [Б. м.] : АИСТ, 2010. – 18 с.

169. СТО АИСТ 6.3–2018. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для защиты растений. Опрыскиватели. Показатели назначения и надежности : стандарт организации. – [Б. м.] : АИСТ, 2018. – 30 с.

170. Сухов, В. В. Особенности выбора траектории и этапов полета беспилотного летательного аппарата на солнечной энергии в условиях неспокойной атмосферы. – Текст : непосредственный / В. В. Сухов, Я. С. Козей // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка–тэхнічных навук = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical–technical series. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 486–500.

171. Теоретические модели высоты пограничного слоя атмосферы и турбулентного вовлечения на его верхней границе / С. С. Зилитинкевич, С. А. Тюряков, Ю. И. Троицкая, Е. А. Мареев // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48, № 1. – С. 150.

172. Технологии, техника и оборудование для координатного (точного) земледелия : учебник / В. И. Балабанов, В. Ф. Федоренко, В. Я. Гольтяпин [и др.] ; под общ. ред. проф. В. И. Балабанова и чл.–корр. РАН, проф. В. Ф. Федоренко. – Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. – 240 с. : ил. – ISBN 978–5–7367–1170–3. (pp. 126–130).

173. 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. – Т. 13, № 5. – С. 38–45.

174. Труфляк, Е. В. Дифференцированные технологии / Е. В. Труфляк. – Краснодар : КубГАУ, 2016. – 44 с.

175. Труфляк, Е. В. Мониторинг и прогнозирование в области точного сельского хозяйства по итогам 2021 г. : монография / Е. В. Труфляк, Н. Ю. Курченко, А. С. Креймер. – Краснодар : КубГАУ, 2022. – 210 с.

176. 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.

177. 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.

178. 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.

179. Труфляк, Е. В. Современное состояние точного сельского хозяйства / Е. В. Труфляк, Н. Ю. Курченко // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – № 69. – С. 372–376. – DOI 10.21515/1999–1703–69–372–376.

180. 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.

181. Труфляк, Е. В. Точное сельское хозяйство: состояние и перспективы / Е. В. Труфляк, Н. Ю. Курченко // Физико–технические проблемы создания новых технологий в агропромышленном комплексе : сборник научных статей по материалам Международной научно–практической конференции, Ставрополь, 19–20 мая 2017 года. – Ставрополь : ООО «Секвойя», 2017. – С. 288–291.

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

183. Туркин, В. Н. Особенности использования агродронов в системе агрохимии и АПК / В. Н. Туркин, А. В. Шемякин, А. П. Кутейникова // Сетевой научный журнал РГАТУ. – 2025. – № 1 (7). – С. 7–21.

184. Тымчук, А. И. Разработка информационной системы качественного анализа объектов сельскохозяйственного назначения на основе аэрофотоснимков : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 2.3.1. / Тымчук Андрей Игоревич. – Краснодар, 2021. – 24 с. (р. 18–20).

185. Указатель действующей нормативной документации на методы испытаний сельскохозяйственной техники, машин и оборудования для переработки сельскохозяйственного сырья: по состоянию на 01.01.2018 / Новокубанский филиал ФГБНУ «Российский научно–исследовательский институт информации и технико–экономических исследований по инженерно–техническому обеспечению агропромышленного комплекса» (КубНИИТиМ). – Новокубанск, 2018. – 49 с.

186. Устройство электрической зарядки капель для опрыскивания сельскохозяйственных культур / А. В. Линенко, В. В. Лукьянов, А. И. Азнагулов,

В. Г. Байназаров // Вестник Башкирского государственного аграрного университета. – 2022. – № 2 (62). – С. 125–128.

187. Федоренко, В. Ф. Современные информационные технологии при испытаниях сельскохозяйственной техники : научный аналитический обзор. – Текст : непосредственный / В. Ф. Федоренко, Н. В. Трубицын. – Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. – 140 с. – ISBN 978–5–7367–1115–4. (pp. 15–25).

188. Федоров, Л. П. Расчет характеристик набора высоты и снижения высотного беспилотного летательного аппарата / Л. П. Федоров, Ю. С. Михайлов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. – 2013. – № 188. – С. 77–83.

189. Филина, В. С. Лазерное излучение как инструмент стимуляции роста кольраби / В. С. Филина, Н. Н. Севостьянова // Сборник трудов IX конгресса молодых ученых, Санкт–Петербург, 15–18 апреля 2020 года. Т. 2. – Санкт–Петербург : федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», 2021. – С. 84–86.

190. Халютин, С. П. Алгоритм определения состава и параметров первичных источников электроэнергии БАС / С. П. Халютин, Б. В. Жмуров // Труды международного симпозиума «Надежность и качество». – 2010. – Т. 1. – С. 425–429.

191. Цифровая трансформация сельского хозяйства России : официальное издание. – Текст : непосредственный / А. Г. Архипов, С. Н. Косогор, О. А. Моторин [и др.] ; отв. за вып. О. А. Моторин, Г. В. Джинчарадзе. – Москва : ФГБНУ «Росинформагротех», 2019. – 80 с. – ISBN 978–5–7367–1495–7. (p. 30–35).

192. Цифровое земледелие (Digital Farming) [Электронный ресурс] / Г. И. Личман [и др.] // Журнал «Нивы России». – 2017 – № 10 (154). – Режим доступа : http://svetich.info/publikacii/tochnoezemledelie/cifrovoe–zemledelie–digital–farming.html.

193. Цокур, Д. С. Улучшение качества регулирования кислотности почвы на основе электроактиватора воды при выращивании томатов в условиях закрытого

грунта : дис. … канд. техн. наук : 05.20.02 / Цокур Дмитрий Сергеевич. – Краснодар, 2013. – 126 с.

194. Шевченко, В. А. Энергетическая эффективность возделывания озимой тритикале в зависимости от фонов минерального питания. – Текст : непосредственный / В. А. Шевченко, П. Н. Просвиряк // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина». – 2010. – № 2. – С. 50–55.

195. Шилов, К. Е. Разработка системы автоматического управления беспилотным летательным аппаратом мультироторного типа / К. Е. Шилов // ТРУДЫ МФТИ. Труды Московского физико–технического института (национального исследовательского университета). – 2014. – Т. 6, № 4 (24). – С. 139–152.

196. Шимон, Н. С. Оптимизация траектории полета беспилотного летательного аппарата при оповещении населения малых населенных пунктов. – Текст : непосредственный / Н. С. Шимон, А. В. Калач // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2017. – № 2 (23). – С. 31–33.

197. Щитов, С. В. Энергетическая оценка транспортно–технологического обеспечения производства сельскохозяйственных культур. – Текст : непосредственный / С. В. Щитов, З. Ф. Кривуца // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2011. – № 11. – С. 180–185.

198. Электрическая мобильная техника в сельском хозяйстве: проблемы и перспективы / И. В. Фадеев, И. А. Успенский, С. Д. Фомин [и др.] // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 3 (75). – С. 366–376.

199. Энергетическая математическая модель опрыскивателя / К. А. Хафизов, А. А. Нурмиев, Р. Н. Хафизов [и др.] // Вестник Казанского государственного аграрного университета. – 2023. – Т. 18, № 2 (70). – С. 117–126.

200. Энергосистема заряда аккумуляторных батарей на высокоскоростных электромашинных преобразователях / О. В. Григораш, С. В. Оськин, Е. Е. Самурганов, О. Я. Ивановский // Сельский механизатор. – 2025. – № 12. – С. 35–37.

201. Эскиев, М. А. Цифровая трансформация образования в России и ее влияние на мировую экономику: новые возможности и перспективы / М. А. Эскиев, Р. А. Рогачев, Х. К. Алиева // Научное обозрение. Серия 1: Экономика и право. – 2024. – № 3. – С. 75–84.

202. Эфендиева, А. А. Практические аспекты внедрения беспилотных летательных аппаратов в растениеводство КБР. – Текст : непосредственный / А. А. Эфендиева // Известия Кабардино–Балкарского научного центра РАН. – 2021. – № 2 (100). – С. 86–94.

203. Юдина, А. В. К вопросу о дифференцированном внесении биопрепаратов в технологиях утилизации соломы в качестве удобрения / А. В. Юдина, И. Ю. Богданчиков // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. – 2025. – № 1 (23). – С. 69–75.

204. Юдина, А. В. Обзор технических решений по дифференцированному внесению минеральных удобрений / А. В. Юдина // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. – 2025. – № 3 (25). – С. 99–105.

205. Юдина, Е. М. Энергосбережение при производстве зерна озимой пшеницы / Е. М. Юдина // Региональный вестник. – 2020. – № 15 (54). – С. 70–72.

206. Якушев, В. В. Информационно–технологические основы прецизионного производства растениеводческой продукции : автореф. дис. ... д–ра с.–х. наук : 06.01.03 / Якушев Вячеслав Викторович. – Санкт–Петербург, 2013. – 52 с. (р. 12).

207. Яцков, Р. П. Технологический процесс и оборудование для опрыскивателей с электроподзарядкой капель : автореф. дис. ... канд. с.–х. наук : 05.20.01 / Яцков Руслан Петрович. – Москва, 2005. – 24 с. (рр. 7, 12).

208. Advances in the Application of Electrostatics in Agriculture: A Review from Macroscale Spray Engineering to Microscale Plant Biostimulation / J. Cao, Z. Jin, J. He, G. Ju, L. Mi, Y. Gao, R. Lei, G. Cheng // Micromachines. – 2025. – № 16. – P. 1285.

209. An Intelligent Vision Based Sensing Approach for Spraying Droplets Deposition Detection. – Текст : электронный / L. Wang, X. Yue, Y. Liu, J. Wang, H. Wang // Sensors. – 2019. – Vol. 19, № 4. – P. 933. – URL : https://www.mdpi.com/1424–8220/19/4/933.

210. Asovsky, V. P. Prospects of protective sprays with the use of unmanned aerial vehicles of helicopter type / V. P. Asovsky, A. S. Kuzmenko // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering: 21, Strasbourg, 09–11 september. – Strasbourg, 2019. – P. 111491.

211. Dalamagkidis, K. On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System : Issues, Challenges, Operational Restrictions, Certification and Recommendations / K. Dalamagkidis, K. P. Valavanis, L. A. Piegl. – 2nd ed. – Dordrecht : Springer, 2012. – 316 p. – ISBN 978–94–007–2478–5.

212. Droplet Deposition and Control of Planthoppers of Different Nozzles in Two–Stage Rice with a Quadrotor Unmanned Aerial Vehicle. – Text : electronic / Pengchao Chen, Yubin Lan, Xiaoyu Huang, Haixia Qi, Guobin Wang, Juan Wang, Linlin Wang, Hanxiang Xiao // Agronomy. – 2020. – Vol. 10, № 303. – URL : www.mdpi.com (дата обращения : 23.01.2026). (p. 8).

213. Effect of Electrostatic Spraying Conditions on Droplet Deposition in Different Depth Areas on the Back of Target. – Text : electronic / Zhao Liang, Hao Ding, Guangming Wang, Xiaohui Zhang // Transactions on Electrical and Electronic Materials. – 2020. – Vol. 21, № 2. – P. 227–234.

214. Electrostatic and Conventional Spraying of Alginate–Based Edible Coating with Natural Antimicrobials for Preserving Fresh Strawberry Quality. – Text : electronic / Greta Peretto, Wen–Xian Du, Roberto J. Avena–Bustillos, Jose De J. Berrios, Paolo Sambo, Tara H. McHugh // Food Bioprocess Technology. – 2017. – Vol. 10, № 1. – P. 165–174.

215. Electrostatic Spray and Non–Electrostatic Spray on Droplet Deposition Quality on Tomato Leaf Surface / J. Guo, Z. Liu, X. Zhao, Y. Yuan, S. Wang // Cienc. Rural. – 2025. – № 55. – Article e20240124.

216. Experimental study of electrostatic spray modes of high–flowrate water with horizontal nozzle. – Text : unmediated / Yeonjoo Cho, Soyeon Kim, Hyunjeong Lim, Sangmi Choi, Minsung Kim // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2019. – Vol. 33, № 9. – P. 4563–4572.

217. Field evaluation of spray drift and environmental impact using an agricultural unmanned aerial vehicle (UAV) sprayer / Guobin Wang, Yuxing Han, Xuan Li, John Andaloro, Pengchao Chen, W. Clint Hoffmann, Xiaoqiang Han, Shengde Chen, Yubin Lan // Science of The Total Environment. – 2020. – Vol. 737. – P. 139793.

218. Green Horizons: Navigating the Future of Agriculture through Sustainable Practices / D. Dönmez, M. A. Isak, T. İzgü, Ö. Şimşek // Sustainability. – 2024. – № 16. – P. 3505.

219. Haralick, R. M. Textural Features for Image Classification / R. M. Haralick, K. Shanmugan, I. Dinstein // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. – 1973. – Vol. 3, № 6. – P. 610–621.

220. Hassler, Samuel C. Unmanned Aircraft System (UAS) Technology and Applications in Agriculture. – Text : electronic / Samuel C. Hassler, Fulya Baysal–Gurel // Agronomy. – 2019. – Vol. 9, № 10. – Article 618. – URL : www.mdpi.com (дата обращения : 23.01.2026).

221. Independent Control Spraying System for UAV–Based Precise Variable Sprayer: A Review. – Text : electronic / Adhitya Saiful Hanif, Xiongzhe Han, Seung–Hwa Yu // Drones. – 2022. – Vol. 6, № 383. – URL : www.mdpi.com. (p. 12).

222. Influence of leaf surface wettability on droplet deposition effect of rape leaves and their correlation. – Text : electronic / Hui Fang, Zeqing Zhang, Shupei Xiao, Yufei Liu // Journal of Agriculture and Food Research. – 2019. – Vol. 1. – Article 100011.

223. Investigation of Optimum Applied Voltage, Liquid Flow Pressure, and Spraying Height for Pesticide Application by Induction Charging / S. Appah, W. Jia, M. Ou, P. Wang, C. Gong // Appl. Eng. Agric. – 2019. – № 35. – P. 795–804.

224. Ji, X. Precision Control of Spraying Quantity Based on Linear Active Disturbance Rejection Control Method / X. Ji, A. Wang, X. Wei // Agriculture. – 2021. – № 11. – P. 761.

225. Khatawkar, D. S. Role of Electrostatics in Artificial Pollination and Future Agriculture / D. S. Khatawkar, S. P. James, D. Dhalin // Curr. Sci. – 2021. – № 120. – P. 484–491.

226. 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. – Russky Island : Institute of Physics Publishing, 2019. – Vol. 272, № 2. – P. 022163.

227. 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.

228. The spraying field characteristics and distribution of deposition of droplets of electrostatic oiler. – Text : unmediated / Zhao–Hui Wang, Fa–Ping Wang, Jia–Rong Fan, Quan–Jie Gao, Jia–Qing Wang // Journal of Engineering and Technology Research. – 2016. – Vol. 8, № 4. – P. 31–46.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А1 - Оборудования для БПЛА

Категория	Примеры моделей	Основные характеристики	Применение
Двигатели	T-Motor MN4014, DLE 120	- Мощность: 0,5-15 кВт - Напряжение: 12-48 В - Тяга: 1-50 кгс - Ресурс: 200-1000 ч	Малые/тяжёлые БПЛА
Пропеллеры	APC 12×6, Carbon 15×5.5	- Диаметр: 12.7-76.2 см (5-30") - Шаг: 7,6-20,3 см (3-8") - Лопасти: 2-8 шт. - Материал: пластик/углепластик - Балансировка: ≤0,1 г	Оптимизация тяги и КПД
Регуляторы скорости (ESC)	Hobbywing XRotor, T-Motor FLAME	- Макс. ток: 20-120 А - Напряжение: 6-52 В - Частота ШИМ: 24-48 кГц - Протоколы: DShot, PWM	Управление оборотами двигателей
Аккумуляторы	LiPo 6S, LiFePO4 12V	- Ёмкость: 2000-30000 мА·ч - Напряжение: 3,7-52 В - Ток разряда: 10-50C - Вес: 200-5000 г	Питание систем
Навигационное оборудование	u-blox M8N, DJI D-RTK 2	- Точность: 1-10 см (RTK) - Частота: 5-20 Гц - Системы: GPS/ГЛОНАСС/Galileo/Bidou	Точное позиционирование
Контроллеры полёта	Pixhawk 4, DJI A3	- Процессор: STM32 (168 МГц) - Датчики: IMU (16 бит) - GPS-точность: 1-3 м	Автономные полёты
Радиопередатчики	TBS Crossfire, FrSky X9D	- Дальность: 1-50 км - Частота: 2,4 ГГц/900 МГц - Каналы: 8-16	Управление БПЛА
Камеры	DJI Zenmuse H20, Sony α7R	- Разрешение: 12-48 Мп - Видео: 4K@60fps - Угол обзора: 60-120°	Аэросъёмка
Мультиспектральные камеры	DJI P4 Multispectral	- Диапазоны: 5-12 (RGB, NIR) - Разрешение: 2-5 Мп/канал	Сельское хозяйство
Тепловизоры	FLIR Vue Pro	- Разрешение: 320×240-640×512 - Дальность: 0,5-2 км	Поисковые операции
Лазерные сканеры	Velodyne Puck	- Точность: ±1-5 см - Дальность: 50-250 м	3D-картография
Опрыскиватели	DJI Agras T10-40/Joyance/XAG	- Ёмкость: 10-30 л - Производительность: 5-20 га/ч	Сельское хозяйство
Разбрасыватели	Hylio AG-130, DroneSeed	- Ёмкость: 5–20 л - Скорость высева: 0.5–5 кг/мин - Радиус: 2–8 м	Посев, удобрения
Захваты	Flyability Gripper, DroneHook	- Грузоподъёмность: 1-10 кг - Точность: ±2-10 см Тип: механический/электромагнитный	Доставка грузов

Категория	Примеры моделей	Основные характеристики	Применение
Динамики	DroneMegaphone 50W	- Мощность: 10–50 Вт - Дальность звука: 100–300 м - Вес: 0,5–2 кг	МЧС, мероприятия
Фонари/прожекторы	Lume Cube 4000, DJI Spotlight	- Световой поток: 1000–5000 лм - Угол: 30–120° - Работа: 1–4 ч	Поисковые операции
Системы сброса	ServoDrop, SkyDrop	- Грузоподъёмность: 0.1–5 кг - Точность сброса: ±0.5 м	Доставка грузов

Таблица А2 - Анализ рынка БПЛА для внесения СЗР и удобрений в России

Название компании	Модель	Взлетный вес/масса, кг	Объем бака, л	Количество форсунок, шт	Средняя производительность га/полет	Время полета, мин	Почасовая производительность, га/ч	Емкость АКБ, мАч	Вид модели
DJI	T10	29/16	10	4	1	9	2-6	9500	
	T16	39,5/18,5	16	8	1	10	5	17500	
	T20	42,6/21,1	20	8	2	10	10	18 000	
	T30	66,5/26,4	30	16	3	8	3-18	29000	
	T40	90/38	40	2-4	4	10	4-21	30000	
	T50	103/52	50	2-4	5	12	21	30000	
XAG	V40	45,8/29,8	16	2	2	10	10	20000	
	P40	48,1/29,2	20	2	2	12	10	20000	
JOYAN	JT10L	27/13	10	4	1	10	6	10000	

Название компании	Модель	Взлетный вес/масса, кг	Объем бака, л	Количество форсунок, шт	Средняя производительность га/полет	Время полета, мин	Почасовая производительность, га/ч	Емкость АКБ, мАч	Вид модели
CE	JT16L	40/18	16	8	2	10	9	20000	
	JT30L	67/27,5	30	10	3	10	14	28000	
ООО «Альбатрос»	Agro Drone	20/10	10	4	0,7	15	4	16000	
	A5h (ДВС)	19/3,8	-		-			5000	

Таблица А3 - Технические характеристики БПЛА для опрыскивания

Объем бака, л	10	30	40
Стоимость (смесительный узел включен), руб	2 000 000	3 000 000	4 000 000
Время полета, мин	10	10	10
Ширина захвата на высоте 3 метра, м	5	9	11
Норма расхода рабочей жидкости, л/га	5-15	5-25	
Производительность за полет, га	0,5-3	3-6	
Производительность за час, га	1,5-9	9-18	21
Количество форсунок, шт	4	16	2
Тип форсунок	Щелевые	Щелевые	Роторные
Силовая установка – пропеллеры (Диаметр х шаг, м)	0,838x0,229	0,965x0,508	1,372x0,722
Максимальная потребляемая мощность, Вт	8000	14400	32000
Силовая установка – двигатель (мощность, Вт)	2000	3600	4000
Силовая установка – двигатель (размер статора, мм)	100x10	100x18	100x33
Мощность системы опрыскивания/распределения, Вт	60	250	250
Мощность датчиковой аппаратуры, Вт	16	16	16
Мощность зарядной станции, Вт	3600	7200	9500
Расход бензогенератора, л/смену	9,6-28,8	20-34,4	38,4-52,8
Расход бензогенератора, л/ч	1,2-3,6	2,5-4,3	3,8-6,6
Расход бензогенератора, л/га	0,4	0,25	0,16
Емкость АКБ, мАч	9500	29000	30000
Время заряда батареи, мин	10	10	10
Длина траектории, м	2094	1227	1024

Таблица А4 - БАС применяемые для мониторинга

Производитель	Модель	Масса, гр	Время полета, мин	Емкость АКБ, мАч	Камера, МП
DJI	Phantom 3	1216	25	4480	12
	Phantom 4	1380	28	5350	12
	Mavic	734	27	2970	12
	Mavic 2	907	31	3950	20
	Mavic 2 Zoom	905	31	3950	12
	Mavic 3	895	46	5000	20
	Mavic Air	430	21	2970	12
	Matrice 100	2355	17	4500	12-48
	Matrice 200	6140	38	7660	12-48
	Matrice 30	3770	41	2x5880	12-48
	Matrice 300	6300	55	2x5935	12-48
	Matrice 600	9500	32	6x4500	12-48
Геоскан	401	9300	60	17000	42
	201	8500	180	34000	45
	701	25000	360	ДВС+АКБ	50
АС-КАМ	АС-МК-4	11500	80		
	АС-МК-6	14000	75		
	SH-3000	3600	300		
	SH-750	75000	300		
	SH-450	450000	360		
	SH-350	350000	300		
	Д-20	29000	840		
	Д-12	12000	150		
	АС-32-08	6000	180		
	АС-32-10	14500	300		
Птеро	Птеро-G1	22000	900	ДВС	
	Птеро-Е5	20000	90		
ZALA	Орлан 10		960		
	Орлан 30				
Supercam	S350	15500	270		

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
Код программы для сегментации изображений

```
#include <fstream>
#include <assert.h>
#include <opencv2/opencv.hpp>
#include <boost/filesystem.hpp>
#include <boost/program_options.hpp>
#include "graph_segmentation.h"
void readDirectory(boost::filesystem::path directory,
   std::multimap<std::string, boost::filesystem::path> &files) {
   assert(boost::filesystem::is_directory(directory));
   files.clear();
   boost::filesystem::directory_iterator end;
   for (boost::filesystem::directory_iterator it(directory); it != end; ++it) {
      std::string extension = it->path().extension().string();
      if (extension == ".png" || extension == ".jpg"
         || extension == ".PNG" || extension == ".JPG") {
         files.insert(std::multimap<std::string,     boost::filesystem::path>::value_type(it->path().string(),
it->path()));
void writeMatCSV(boost::filesystem::path file, const cv::Mat& mat) {
   assert(!mat.empty());
   assert(mat.channels() == 1);
   std::ofstream file_stream(file.c_str());
   for (int i = 0; i < mat.rows; i++) {
      for (int j = 0; j < mat.cols; j++) {
         file_stream << mat.at<uchar>(i, j);
         if (j < mat.cols - 1) {
            file_stream << " ";
      if (i < mat.rows - 1) {
         file_stream << "\n";
   file_stream.close();
bool is4ConnectedBoundaryPixel(const cv::Mat &labels, int i, int j) {
   if (i > 0) {
      if (labels.at<int>(i, j) != labels.at<int>(i - 1, j)) {
         return true;
   if (i < labels.rows - 1) {
      if (labels.at<int>(i, j) != labels.at<int>(i + 1, j)) {
         return true;
   if (j > 0) {
      if (labels.at<int>(i, j) != labels.at<int>(i, j - 1)) {
         return true;
   if (j < labels.cols - 1) {
      if (labels.at<int>(i, j) != labels.at<int>(i, j + 1)) {
         return true;
   return false;
void drawContours(const cv::Mat &image, const cv::Mat &labels, cv::Mat &contours) {
   assert(!image.empty());
   assert(image.channels() == 3);
   assert(image.rows == labels.rows && image.cols == labels.cols);
   assert(labels.type() == CV_32SC1);
   contours.create(image.rows, image.cols, CV_8UC3);
   cv::Vec3b color(0, 0, 0); // Black contours
```

```
   for (int i = 0; i < contours.rows; ++i) {
      for (int j = 0; j < contours.cols; ++j) {
         if (is4ConnectedBoundaryPixel(labels, i, j)) {
            contours.at<cv::Vec3b>(i, j) = color;
         }
         else {
            contours.at<cv::Vec3b>(i, j) = image.at<cv::Vec3b>(i, j);
int main (int argc, char ** argv) {
   boost::program_options::options_description desc("Allowed options");
   desc.add_options()
      ("help,h", "produce help message")
      ("input", boost::program_options::value<std::string>(), "folder containing the images to process")
      ("threshold", boost::program_options::value<float>()->default_value(20.0f), "constant for
threshold function")
      ("minimum-size", boost::program_options::value<int>()->default_value(10), "minimum
component size")
      ("output", boost::program_options::value<std::string>()->default_value("output"), "save
segmentation as CSV file and contour images");
   boost::program_options::positional_options_description positional_options;
   positional_options.add("input", 1);
   positional_options.add("output", 1);
   boost::program_options::variables_map parameters;
boost::program_options::store(boost::program_options::command_line_parser(argc,
argv).options(desc).positional(positional_options).run(), parameters);
   boost::program_options::notify(parameters);
   if (parameters.find("help") != parameters.end()) {
      std::cout << desc << std::endl;
      return 1;
   boost::filesystem::path output_dir(parameters["output"].as<std::string>());
   if (!output_dir.empty()) {
      if (!boost::filesystem::is_directory(output_dir)) {
         boost::filesystem::create_directories(output_dir);
   boost::filesystem::path input_dir(parameters["input"].as<std::string>());
   if (!boost::filesystem::is_directory(input_dir)) {
      std::cout << "Image directory not found ..." << std::endl;
      return 1;
   float threshold = parameters["threshold"].as<float>();
   int minimum_segment_size = parameters["minimum-size"].as<int>();
   std::multimap<std::string, boost::filesystem::path> images;
   readDirectory(input_dir, images);
   for (std::multimap<std::string, boost::filesystem::path>::iterator it = images.begin(); it !=
images.end(); ++it) {
      cv::Mat image = cv::imread(it->first);
      GraphSegmentationMagicThreshold magic(threshold);
      GraphSegmentationEuclideanRGB distance;
      GraphSegmentation segmenter;
      segmenter.setMagic(&magic);
      segmenter.setDistance(&distance);
      segmenter.buildGraph(image);
      segmenter.oversegmentGraph();
      segmenter.enforceMinimumSegmentSize(minimum_segment_size);
      cv::Mat labels = segmenter.deriveLabels();
```

```
    boost::filesystem::path csv_file(output_dir
        / boost::filesystem::path(it->second.stem().string() + ".csv"));
    writeMatCSV(csv_file, labels);
    boost::filesystem::path contours_file(output_dir
        / boost::filesystem::path(it->second.stem().string() + ".png"));
    cv::Mat image_contours;
    drawContours(image, labels, image_contours);
    cv::imwrite(contours_file.string(), image_contours);
return 0;
```

Код программы для подсчета количества растений

```
import cv2
import numpy as np
import os
from matplotlib import pyplot as plt
from skimage.feature import peak_local_max
from skimage.segmentation import watershed
def count_sunflowers(image_path, min_area=50, max_area=5000, circularity_thresh=0.15):
    """
    Полная программа для подсчёта растений подсолнечника на изображении
    Параметры:
    image_path - путь к изображению
    min_area - минимальная площадь растения в пикселях (по умолчанию 50)
    max_area - максимальная площадь растения в пикселях (по умолчанию 5000)
    circularity_thresh - порог круглости контура (0-1, по умолчанию 0.15)
    Возвращает:
    Количество найденных растений и изображение с разметкой
    """
        # 1. Загрузка и проверка изображения
    if not os.path.exists(image_path):
        raise FileNotFoundError(f"Файл не найден: {image_path}")
    img = cv2.imread(image_path)
    if img is None:
        raise ValueError("Не удалось загрузить изображение")
    # 2. Конвертация цветовых пространств
    rgb = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2RGB)
    hsv = cv2.cvtColor(img, cv2.COLOR_BGR2HSV)
    # 3. Создание маски растений (диапазон зелёного)
    lower_green = np.array([25, 40, 40])
    upper_green = np.array([90, 255, 255])
    mask = cv2.inRange(hsv, lower_green, upper_green)
    # 4. Улучшение маски морфологическими операциями
    kernel = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_ELLIPSE, (7,7))
    mask = cv2.morphologyEx(mask, cv2.MORPH_OPEN, kernel, iterations=1)
    mask = cv2.morphologyEx(mask, cv2.MORPH_CLOSE, kernel, iterations=2)
    # 5. Применение Watershed для разделения растений
    distance_map = cv2.distanceTransform(mask, cv2.DIST_L2, 5)
    local_max = peak_local_max(distance_map, min_distance=20, labels=mask)
    markers = np.zeros(distance_map.shape, dtype=np.int32)
    for i, (x, y) in enumerate(local_max):
        markers[x, y] = i + 1
    labels = watershed(-distance_map, markers, mask=mask)
    # 6. Поиск и фильтрация контуров
    plants = []
    for label in np.unique(labels):
        if label == 0:  # Игнорируем фон
            continue
        label_mask = np.zeros(mask.shape, dtype=np.uint8)
        label_mask[labels == label] = 255
        contours, _ = cv2.findContours(label_mask, cv2.RETR_EXTERNAL,
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE)
        for cnt in contours:
```

```
            area = cv2.contourArea(cnt)
            perimeter = cv2.arcLength(cnt, True)
            circularity = 4 * np.pi * area / (perimeter ** 2) if perimeter > 0 else 0

            if min_area < area < max_area and circularity > circularity_thresh:
                plants.append(cnt)
    # 7. Визуализация результатов
    result = rgb.copy()
    cv2.drawContours(result, plants, -1, (0, 255, 0), 2)
    # 8. Отображение графиков
    plt.figure(figsize=(18, 6))
    plt.subplot(1, 3, 1)
    plt.imshow(rgb)
    plt.title('Исходное изображение')
    plt.subplot(1, 3, 2)
    plt.imshow(mask, cmap='gray')
    plt.title('Бинарная маска')
    plt.subplot(1, 3, 3)
    plt.imshow(result)
    plt.title(f'Найдено растений: {len(plants)}')
    plt.tight_layout()
    plt.show()
    return len(plants), result
if __name__ == "__main__":
    try:
        # УКАЖИТЕ ПУТЬ К ВАШЕМУ ИЗОБРАЖЕНИЮ ЗДЕСЬ ↓
        image_path = r"/home/hp/kolya/2.JPG"
        # Вызов функции подсчёта
        count, result_img = count_sunflowers(image_path)
        # Сохранение результата
        output_path = os.path.join(os.path.dirname(image_path), "result.jpg")
        cv2.imwrite(output_path, cv2.cvtColor(result_img, cv2.COLOR_RGB2BGR))

        print(f"Результат сохранён в: {output_path}")
        print(f"Всего обнаружено растений: {count}")
    except Exception as e:
        print(f"Ошибка: {str(e)}")
```

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица Б1 - Данные для ортофотоплана для подсолнечника и кукурузы в разных фазах развития

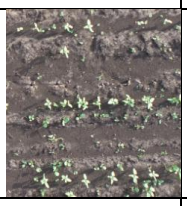
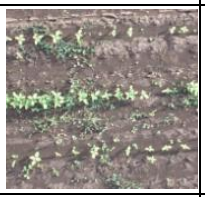
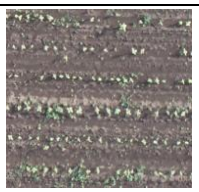
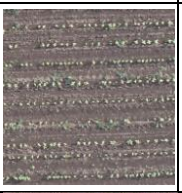
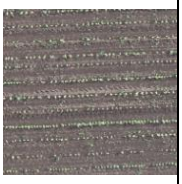
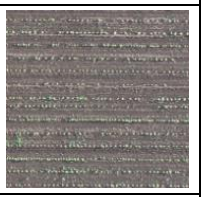
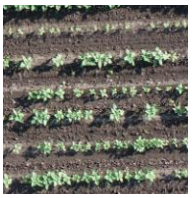
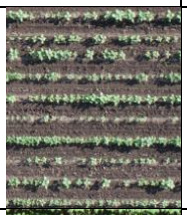
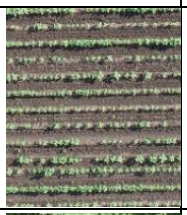
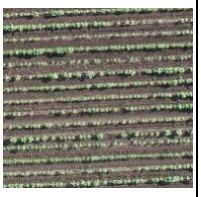
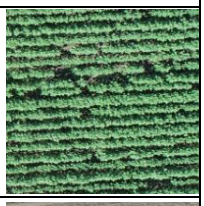
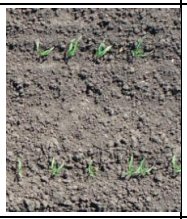
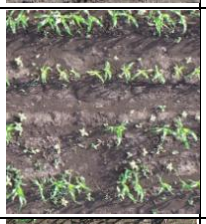
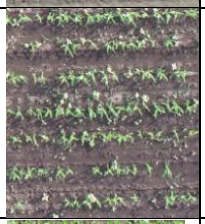
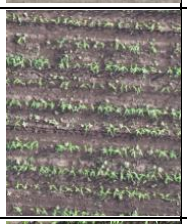
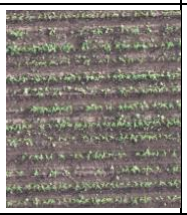
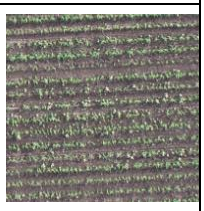
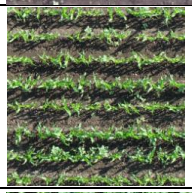
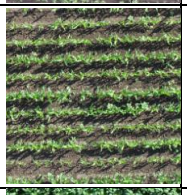
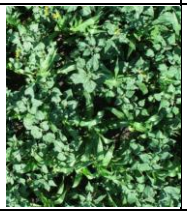
Культура Дата	Высота съемки, м					
	5	10	20	30	40	50
Подсолнечник 31.05						
Подсолнечник 14.06						
Подсолнечник 7.07						
Кукуруза 17.05						
Кукуруза 31.05						
Кукуруза 14.06						
Кукуруза 7.07						

Таблица Б2 - Измерение размеров растений

Культура Фаза	Горизонтальная плоскость	Фронтальная плоскость
Подсолнечник 1-я пара настоящих листьев		
Подсолнечник 2-я пара настоящих листьев		
Подсолнечник Образование корзинки		
Кукуруза 3-4 листка		
Кукуруза 5-6 листков		

Кукуруза 10-12 листков		
Кукуруза цветение		

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г1 - Результаты измерений N-тестером поля 10в

1	561	30	08.04.2012	13.04	46.714025	40.019715
5	487	30	08.04.2012	13.12	46.713923	40.020650
10	492	30	08.04.2012	13.20	46.713570	40.021891
15	451	30	08.04.2012	13.26	46.713191	40.022963
20	453	30	08.04.2012	13.33	46.713050	40.024780
25	555	30	08.04.2012	13.39	46.712948	40.026043
30	512	30	08.04.2012	13.50	46.711053	40.020715
35	494	30	08.04.2012	13.56	46.710751	40.021501
40	393	30	08.04.2012	14.01	46.710758	40.022418
45	506	30	08.04.2012	14.06	46.710635	40.023366
50	464	30	08.04.2012	14.12	46.710815	40.024495
55	364	30	08.04.2012	14.18	46.710553	40.025780
60	504	30	08.04.2012	14.24	46.710245	40.026821

Таблица Г2- Результаты измерений N-тестером поля 11в

1	451	30	08.04.2012	12.33	46.714286	40.030546
5	317	30	08.04.2012	12.19	46.714290	40.032233
10	474	30	08.04.2012	12.13	46.714056	40.031666
15	450	30	08.04.2012	12.07	46.713536	40.031816
20	409	30	08.04.2012	12.01	46.713376	40.033050
25	432	30	08.04.2012	11.56	46.713031	40.033563
30	550	30	08.04.2012	11.31	46.710928	40.027418
35	442	30	08.04.2012	11.11	46.710465	40.029221
40	412	30	08.04.2012	10.58	46.708370	40.030250
45	455	30	08.04.2012	10.43	46.707201	40.029148
50	455	30	08.04.2012	10.23	46.707196	40.030595
55	410	30	08.04.2012	10.09	46.706413	40.032133
60	406	30	08.04.2012	09.56	46.706225	40.032520

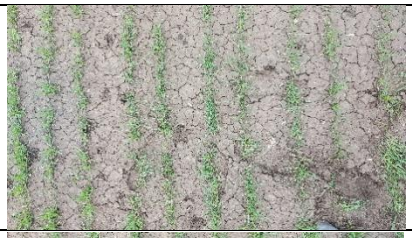
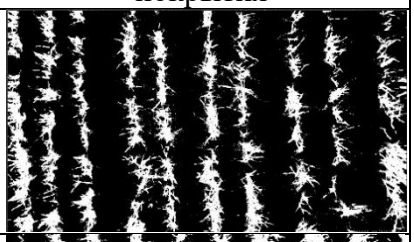
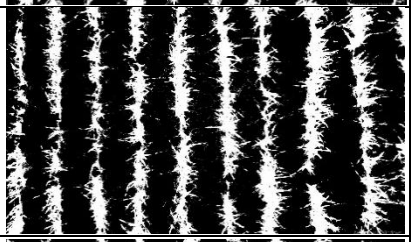
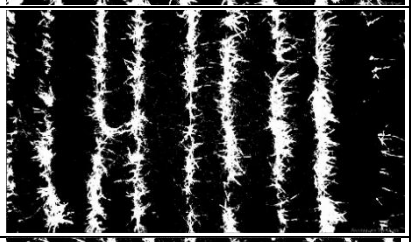
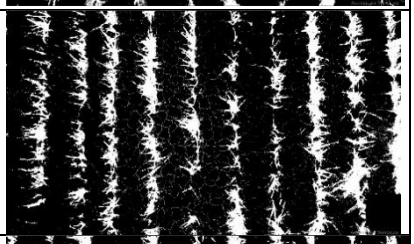
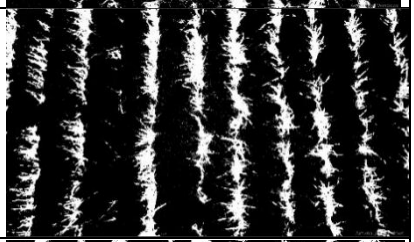
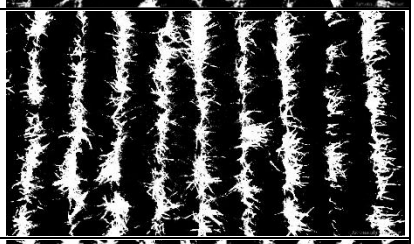
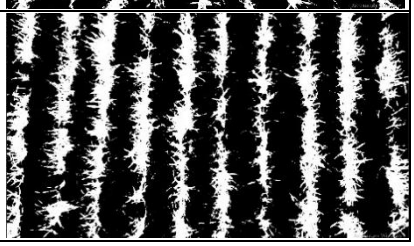
Таблица Г3- Результаты измерений GreenSeeker поля 10в

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
1	0,29	0,26	0,24	0,26	0,30	0,30	0,24	0,29	0,26	0,28	0,27
5	0,29	0,25	0,32	0,27	0,31	0,33	0,27	0,35	0,31	0,30	0,30
10	0,23	0,20	0,29	0,30	0,28	0,28	0,27	0,31	0,26	0,28	0,27
15	0,20	0,27	0,20	0,24	0,22	0,24	0,28	0,26	0,28	0,27	0,25
20	0,21	0,17	0,18	0,17	0,31	0,25	0,23	0,24	0,23	0,21	0,22
25	0,32	0,21	0,37	0,39	0,32	0,27	0,30	0,29	0,34	0,34	0,32
30	0,35	0,30	0,39	0,37	0,36	0,32	0,32	0,31	0,35	0,32	0,34
35	0,25	0,28	0,30	0,33	0,29	0,25	0,26	0,20	0,33	0,32	0,28
40	0,24	0,25	0,25	0,22	0,21	0,16	0,23	0,21	0,23	0,19	0,22
45	0,22	0,22	0,27	0,26	0,21	0,19	0,20	0,22	0,27	0,23	0,23
50	0,27	0,30	0,27	0,28	0,28	0,23	0,25	0,31	0,21	0,28	0,27
55	0,28	0,27	0,34	0,37	0,25	0,32	0,30	0,30	0,25	0,28	0,30
60	0,44	0,38	0,33	0,31	0,27	0,31	0,33	0,30	0,28	0,27	0,32

Таблица Г4 - Результаты измерений GreenSeeker поля 11в

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Среднее
1	0,48	0,45	0,43	0,20	0,45	0,42	0,45	0,39	0,42	0,33	0,40
5	0,38	0,45	0,44	0,47	0,38	0,33	0,48	0,49	0,45	0,43	0,43
10	0,26	0,28	0,26	0,24	0,28	0,24	0,26	0,30	0,24	0,28	0,26
15	0,36	0,32	0,33	0,26	0,22	0,30	0,25	0,25	0,27	0,22	0,28
20	0,27	0,29	0,33	0,26	0,22	0,30	0,25	0,25	0,27	0,22	0,27
25	0,32	0,31	0,30	0,28	0,28	0,28	0,26	0,32	0,36	0,30	0,30
30	0,44	0,37	0,38	0,43	0,41	0,37	0,44	0,53	0,55	0,53	0,45
35	0,31	0,29	0,36	0,33	0,35	0,34	0,36	0,35	0,37	0,29	0,34
40	0,31	0,29	0,32	0,25	0,32	0,31	0,28	0,27	0,28	0,30	0,29
45	0,29	0,32	0,36	0,31	0,34	0,31	0,27	0,26	0,40	0,46	0,33
50	0,38	0,33	0,30	0,29	0,30	0,29	0,26	0,26	0,29	0,27	0,30
55	0,33	0,31	0,24	0,29	0,23	0,27	0,30	0,33	0,32	0,28	0,29
60	0,31	0,29	0,32	0,33	0,30	0,29	0,30	0,32	0,33	0,33	0,31

Таблица Г5 - Результаты получения карт проективного покрытия в местах измерения N-тестером и GreenSeeker на поле 10в

№	Вид сверху	Вид под углом 45 град	Карта проективного покрытия
1			
5			
10			
15			
20			
25			
30			

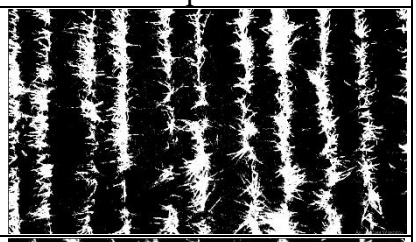
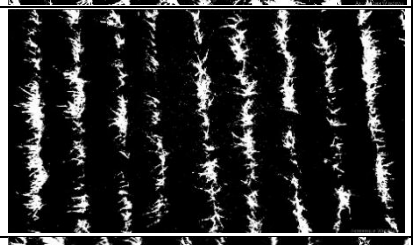
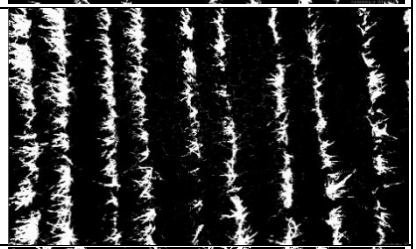
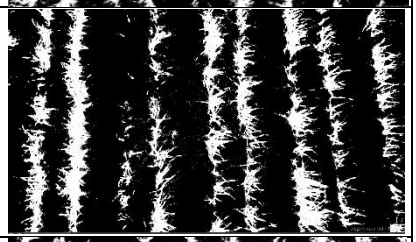
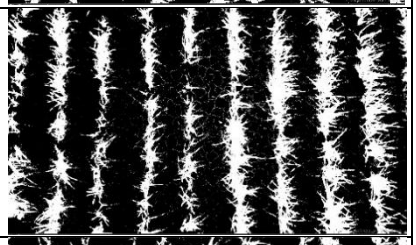
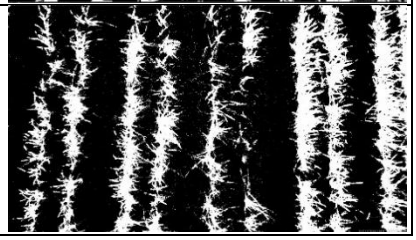
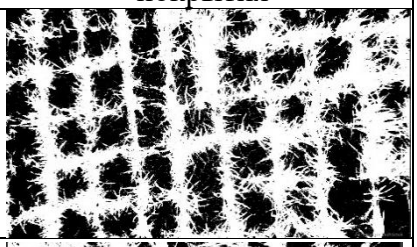
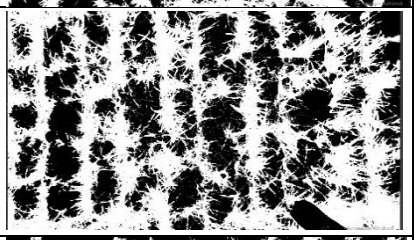
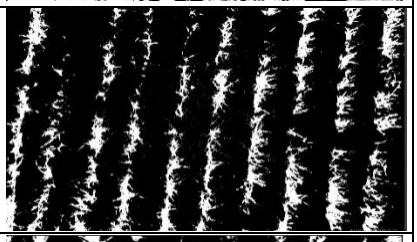
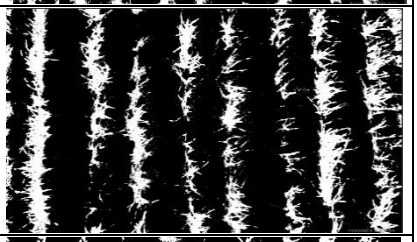
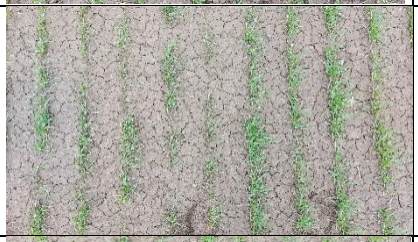
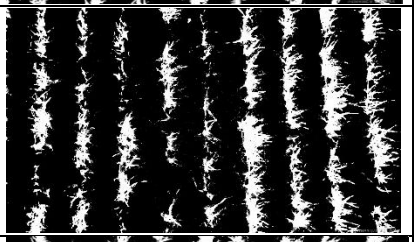
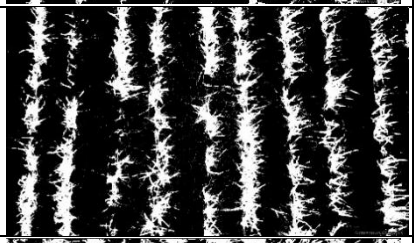
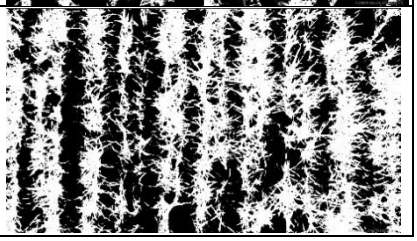
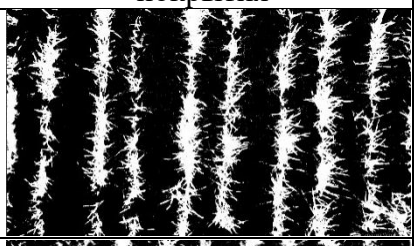
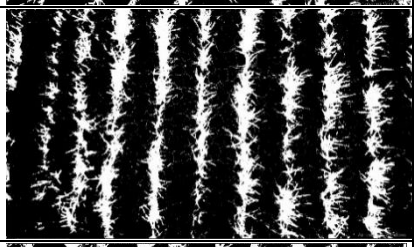
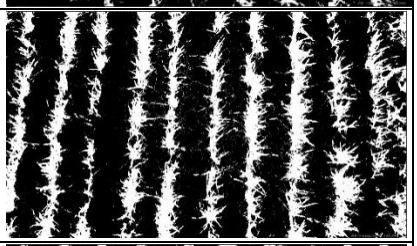
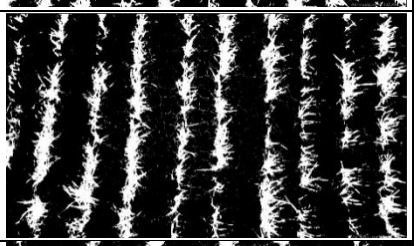
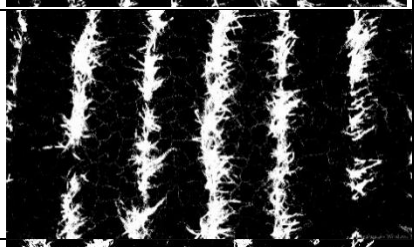
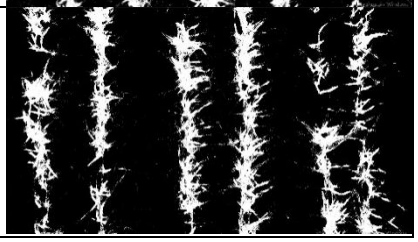
№	Вид сверху	Вид под углом 45 град	Карта проективного покрытия
35			
40			
45			
50			
55			
60			

Таблица Г6 - Результаты получения карт проективного покрытия в местах измерения N-тестером и GreenSeeker на поле 11в

№	Вид сверху	Вид под углом 45 град	Карта проективного покрытия
1			
5			
10			
15			
20			
25			
30			

№	Вид сверху	Вид под углом 45 град	Карта проективного покрытия
35			
40			
45			
50			
55			
59			

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
Акты внедрения результатов диссертации в производственный и учебный процессы

ПРОТОКОЛ № 3

экспертной научно-технической секции «Механизация» научно-технического совета министерства сельского хозяйства и перерабатывающей промышленности Краснодарского края

г. Краснодар 30 ноября 2023 г.

Участвовали члены ЭНТС:

Д.Н. Павлов — председатель секции, начальник управления инженерно-технической политики министерства

С.С. Тимченко — заместитель председателя секции, заместитель начальника управления, начальник отдела инженерно-технического развития и охраны труда министерства

А.П. Плитинь — секретарь секции, ведущий консультант отдела инженерно-технического развития и охраны труда управления инженерно-технической политики

Члены секции:

Абаев В.В. — председатель ассоциации производителей сельскохозяйственной техники и оборудования АПК Краснодарского края

Ю.Н. Котенко — ведущий консультант отдела инженерно-технического развития и охраны труда управления инженерно-технической политики

ПОВЕСТКА ДНЯ:

1. Рассмотрение итогов проведённой 30-й Международной выставки сельскохозяйственной техники, оборудования и материалов для производства и переработки растениеводческой сельхозпродукции «Югагро 2023».
2. Рассмотрение результатов диссертационной работы Курченко Н.Ю.

СЛУШАЛИ: Котенко Ю.Н.: о новинках, в сфере инженерно-технического развития агропромышленного комплекса, представленных в рамках проведения 30-й Международной выставки сельскохозяйственной техники, оборудования и материалов для производства и переработки растениеводческой сельхозпродукции «Югагро 2023».

Павлова Д.Н.: о том, что результаты диссертационной работы Курченко Н.Ю. нашли свое применение по следующим направлениям:

1. Методика выбора беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для оптимизации работ по мониторингу и диагностике в растениеводстве.
2. Конструктивные решения БПЛА (патенты РФ № 278992, № 2793489), которые могут быть реализованы на предприятиях агропромышленного комплекса Краснодарского края.
3. Технико-экономическая оценка внедрения БПЛА в систему растениеводства.

4. Результаты исследования факторов влияния на параметры и режимы работы БПЛА.

5. Результаты исследования по возможности применения карт-заданий для дифференцированного внесения удобрений основе RGB изображений, полученных с БПЛА по сравнению с внесением удобрений с одной дозой, повысило урожайность на 3,58 ц/га. Дополнительные капиталовложения для поля площадью 96 га составили 8640 руб. и эффект от прибавки урожая 447 тыс. руб.

6. Результаты исследования применения беспилотной технологии внесения материалов при возделывании озимого ячменя с определением урожайности и экономической эффективности в сравнении с наземной технологией обработки озимого ячменя. Расчет экономической эффективности использования беспилотной технологии показал, что ее производительность меньше в 4 раза. При использовании данной технологии с дифференцированным внесением удобрений повысилась урожайность озимого ячменя на 3,6 % при уменьшении количества удобрений на 2 %. Расход горюче-смазочных материалов снизился в 1,4 раза, металлоемкость в 26,7 раза. Дополнительные капиталовложения при использовании наземной технологии составляют 4771 тыс. руб.

7. Результаты исследования способа улучшения качества рабочего раствора при опрыскивании с БПЛА и использовании электроактиватора воды. Наибольший процент гибели сорняков был получен при использовании электроактивированной воды и составил при норме применения 0,6 л\га; 0,8 л\га; 1 л\га соответственно, 54 %; 81%; 86% для анолита, 65%; 84%; 83% для католита, в то время как эффективность использования воды без подготовки составила 39%, 69%, 78%.

РЕШИЛИ: 1. Принять информацию Котенко Ю.Н. и учесть ее при выполнении дальнейшей работы.

2. Результаты исследований Курченко Н.Ю., выполненные в рамках диссертационного исследования на соискание степени доктора технических наук, являются актуальными и имеющими важное народнохозяйственное значение для динамичного-устойчивого развития аграрного сектора сельских территорий и социального роста уровня жизни населения, так же позволят повысить качество продукции растениеводства Краснодарского края.

3. Рекомендовать результаты научных исследований и сформированные на их основе научные положения по применению БПЛА в растениеводстве использовать для внедрения во все категории растениеводческих предприятий различной специализации Краснодарского края, а также, к использованию при проведении научных исследований.

Председатель ЭНТС «Механизация» Д.Н. Павлов

Секретарь секции А.П. Плитинь

УТВЕРЖДАЮ
Заместитель министра топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства Краснодарского края
_____Д.А.Сорокалетов

АКТ
о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы

Министерство топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства настоящим актом подтверждает, что в соответствии с Государственной программой Краснодарского края «Развитие топливно-энергетического комплекса» результаты диссертационной работы Курченко Н.Ю. нашли свое применение по следующим направлениям.

1. Методика выбора беспилотного летательного аппарата (БПЛА) для оптимизации работ по мониторингу и диагностике инженерных коммуникаций топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства.
2. Конструктивные решения БПЛА (патенты РФ № 278992, № 2793489), которые могут быть реализованы на предприятиях топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства.
3. Технико-экономическая оценка внедрения БПЛА в систему работ по обследованию, проектированию, монтажу и эксплуатации инженерных коммуникаций топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства.
4. Результаты исследования факторов влияния на параметры и режимы работы БПЛА.

Результаты исследований, выполненные в рамках диссертационного исследования на соискание степени доктора технических наук, позволят повысить надежность и качество энергоснабжения предприятий топливно-энергетического комплекса и жилищно-коммунального хозяйства Краснодарского края.

Согласовано:
Начальник отдела инвестиций и энергосбережения
_____А.С. Кедров

УТВЕРЖДАЮ
Генеральный директор
ООО «Агро-Строительные Технологии»
_____ М. В. Сапунов
«06» 10 августа 2022 г.

АКТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ
эффективности применения шин разного давления при возделывании озимого ячменя

Эксперимент по оценке эффективности применения шин MICHELIN AXIOBIB2 разного давления при возделывании озимого ячменя проводился с 12 октября 2021 г. по 4 июля 2022 г. в ООО «Краснодарагроальянс».

Для проведения исследований было выбрано поле 8 площадью 155 га (село Сергиевское Гиагинского района Республики Адыгея), которое разделили на части так, чтобы опыт (43 га) – использовались шины низкого давления и контроль (43 га) – использовались шины стандартного давление были в однородной зоне, а неоднородный участок – не участвовал в эксперименте.

Перед каждой технологической операцией осуществлялась подготовка агрегатов и взвешивание для обоснования давления в шинах:

– дискование стерни (2.10.2021 г.): шины не участвовали в эксперименте;

– внесение удобрений (13.10.2021 г.): давление шин опыт – 1 бар; давление шин контроль – 1,6 бар;

– дискование после внесения удобрений (13.10.2021 г.): давление шин опыт – 0,6 бар; давление шин контроль – 1,4 бар;

– посев (17–18.10.2021 г.): давление шин опыт – 0,6 бар; давление шин контроль – 1,2 бар;

– прикатывание посевов (20.10.2021 г.): давление шин опыт – 0,6 бар; давление шин контроль – 0,6 бар; движение агрегата – по диагонали;

– внесение жидких удобрений (27.02.2022 г.): давление шин передних опыт – 0,6 бар; давление шин задних опыт – 0,8 бар; давление шин передних контроль – 1,4 бар; давление шин задних контроль – 1,4 бар.

– внесение гербицидов и фунгицидов – давление шин опыт и контроль – 2,5 бар.

Проводился наземный мониторинг всходов в течении вегетации озимого ячменя.

Измерения производились в 6 локациях опытного участка и 6 локациях контрольного участка, по следу и вне следа. Всего на опыте и контроле отбирались пробы с 24 мест соответственно.

Проводился также дистанционный мониторинг всходов в течении вегетации озимого ячменя беспилотными летательными аппаратами и космоснимками.

Определение биологической урожайности выполнялось 29.06.2022 г. рамкой размером 0,7 × 1,43 м (по ширине колеи) площадью 1 м^2 в 6 точках по следу и в 6 точках вне следа по опыту и контролю, в которых производился анализ растений на протяжении всей вегетации.

В результате сравнения на опыте по следу по сравнению с контролем по следу получили большие значения по:

– количеству колосьев – на 26 %;
– длине колоса – 4 %;
– массе зерна 20 колосьев – 9 %;
– массе зерна с 1 м^2 – 24 %;
– натура и содержание протеина – различаются не существенно.

В итоге биологическая урожайность (29.06.2022 г.) составляет для опыта – 7,1 т/га; контроля – 6,8 т/га (разница – 4,4 %); комбайновая урожайность (4.07.2022 г.) для опыта 6,9 т/га; контроля – 6,3 т/га (разница – 9,5 %); итоговая урожайность для опыта – 7 т/га; контроля – 6,6 т/га (разница – 6,1 %).

Главный агроном
ООО «Краснодарагроальянс» Р. В. Завалин

Заместитель генерального директора-директор
филиала ООО «АСТ» в п. Красносельский А.И. Сотников

Заведующий кафедрой эксплуатации
машинно-тракторного парка Кубанского ГАУ
д.т.н., профессор Е. В. Труфляк

Заведующий кафедрой физики Кубанского ГАУ,
к.т.н., доцент Н. Ю. Курченко

Доцент кафедры физиологии
и биохимии растений Кубанского ГАУ,
к.с.-х.н. Ю. В. Подушин

УТВЕРЖДАЮ
Директор по растениеводству АО фирмы
«Агрокомплекс» им. Н. И. Ткачева
_____С. А. Шевель
«___» _____2021 г.

АКТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ
дифференцированного внесения удобрений с использованием индекса вегетации Биоиндекс

На предприятии «Север Кубани» АО фирмы «Агрокомплекс» им. Н. И. Ткачева в селе Полтавченское Кущевского района Краснодарского края со 2 апреля по 20 июля 2021 г. проводился эксперимент по сравнительному анализу дифференцированного внесения удобрений с использованием Биоиндекса и индекса вегетации NDVI.

В эксперименте принимали участие от Кубанского ГАУ – Труфляк Е. В., д.т.н, профессор, руководитель центра прогнозирования и мониторинга в области точного с.-х., автоматизации и роботизации (центр); Курченко Н. Ю., к.т.н., доцент, заместитель руководителя центра; Подушин Ю. В., к.с.-х.н., доцент кафедры физиологии и биохимии растений; Даду Монес М. Ю., аспирант; от ООО «АИС» – Курьян В. Е., к.ф-м.н., генеральный директор.

Целью эксперимента являлся сравнительный анализ дифференцированного внесения удобрений по картам-заданиям с использованием Биоиндекса и индекса вегетации NDVI, полученных с камер беспилотных летательных аппаратов.

Для эксперимента было выбрано три рядом расположенные поля под озимую пшеницу: поле 10в – 92 га (NDVI), поле 11в – 96 га (Биоиндекс) и поле 12в – 99 га (контроль).

Доза внесения аммиачной селитры при первой подкормке всех полей была одинаковой и составляла 150 кг/га.

Перед второй подкормкой на поле 10в производилась съемка мультиспектральной камерой и дифференцированно вносились удобрения с использованием индекса NDVI. Дозы внесения удобрений по зонам вегетации сильной, средней и слабой составляли соответственно 116, 130 и 144 кг/га.

На поле 11в производилась съемка RGB камерой. Полученные снимки сшивались в ортофотоплан. Ортофотоплан обрабатывался специальными алгоритмами, разработанными ООО «АИС». В результате была получена карта распределения биомассы по площади поля. Биоиндекс строился путем обработки изображения, имеющего три цветовых канала (красного, синего, зеле-

ного). В отличие от NDVI при построении которого используется только два канала (красный, ближний инфракрасный) и требуется использование специальной дорогостоящей аппаратуры, проведение калибровок, применение Биоиндекса имеет меньше погрешностей и более точно отражает состояние посевов при меньших затратах на оборудование. Далее дифференцированно вносились удобрения при второй подкормке с использованием Биоиндекса. Дозы внесения удобрений по зонам вегетации составляли соответственно 114, 130 и 146 кг/га.

Поле 12в принималось за контроль с одинаковой дозой внесения удобрений – 130 кг/га.

По результатам уборки урожая получены следующие данные: поле 10в – валовый сбор – 512,3 т (55,7 ц/га); поле 11в – валовый сбор – 580,62 т (60,48 ц/га); поле 12в – валовый сбор – 563,45 т (56,9 ц/га).

Расчет экономической эффективности показал, что использование Биондекса и дифференцированного внесения удобрений (поле 11в) по сравнению с внесением удобрений с одной дозой (поле 12в) повысило урожайность на 3,58 ц/га. Дополнительные капиталовложения для поля 11в площадью 96 га составили 8640 руб. и эффект от прибавки урожая 447 тыс. руб. Дополнительные капиталовложения окупаются менее, чем за один сезон.

Главный агроном
АО фирмы «Агрокомплекс»
им. Н. И. Ткачева — С. П. Капралов

Руководитель центра прогнозирования
и мониторинга в области точного с.-х.,
автоматизации и роботизации — Е. В. Труфляк

Заместитель руководителя центра прогнозирования
и мониторинга в области точного с.-х.,
автоматизации и роботизации — Н. Ю. Курченко

Доцент кафедры физиологии
и биохимии растений — Ю. В. Подушин

Генеральный директор
ООО «АИС» — В. Е. Курьян

Аспирант — Даду Монес М. Ю.

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ
_____ А. Г. Кощаев
«__» _____ 2023 г.

АКТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ

использования беспилотной технологии внесения удобрений, гербицидной, инсектицидной и фунгицидной обработок при возделывании озимого ячменя

На опытном поле учхоза «Кубань» с 8.10.2021 г. по 21.06.2022 г. проводился эксперимент изучения дифференцированного внесения аммиачной селитры, гербицидной, инсектицидной и фунгицидной обработках при возделывании озимого ячменя с использованием сельскохозяйственного дрона и наземных средств механизации. Цель исследований – апробация беспилотной технологии внесения материалов при возделывания озимого ячменя с определением урожайности и экономической эффективности в сравнении с наземной технологией обработки озимого ячменя.

В процессе проведенного эксперимента выполнено сравнение беспилотной технологии внесения азотных удобрений, средств защиты растений (беспилотный летательный аппарат Agras T10) и наземной с использованием разбрасывателя (Amazone ZA-X Perfect) удобрений и опрыскивателя (Amazone UF-901).

Перед подкормкой аммиачной селитрой осуществлялся облет БПЛА Phantom 4 Pro с получением ортофотоплана с дальнейшим преобразованием в индекс вегетации «Биоиндекс». Разделили полученные делянки с сильным и слабым развитием растений. Средняя доза внесения удобрений составляла 100 кг/га, далее производилась дифференциация удобрений на различных участках, в зависимости от состоянии посевов по «Биоиндексу». Дозы внесения аммиачной селитры варьировались: сорт Сельхоз – 80 кг/га, 100 кг/га (контроль);, 120 кг/га; сорт Версаль – 80 кг/га, 93 кг/га;, 100 кг/га (контроль), 107 кг/га; сорт Каррера – 80 кг/га, 93 кг/га, 100 кг/га (контроль), 120 кг/га.

Удобрения на исследуемых делянках вносились 9.03.2022 г. беспилотником Agras T10. Удобрения на производственных посевах ячменя вносились 9.03.2022 г. трактором МТЗ-1221 с разбрасывателем Amazone ZX-A Perfect дозой 100 кг/га аммиачной селитры.

7.04.2022 г. производилась обработка делянок гербицидом с использованием также БПЛА Agras T10. Доза внесения раствора составляла 7,5 л/га (препарат Аксиал – 1 л/га, Дерби – 0,07 л/га).

На производственных посевах 7.04.2022 г. производилась обработка трактором МТЗ-80 с опрыскивателем полевым Amazone UF-901 гербицидом дозой 200 л/га.

Обработка фунгицидом и инсектицидом делянок озимого ячменя дроном проведена 13.05.2022 г. также сельскохозяйственным дроном Agras T10 (фунгицид + инсектицид: Элатус Риа 0,5 л/га + Эфория 0,2 л/га).

На производственных посевах 7.04.2022 г. производилась обработка трактором МТЗ-80 с опрыскивателем полевым Amazone UF-901 гербицидом дозой 200 л/га.

Уборка урожая осуществлялась 21.06.2022 г. комбайном TERRION 2010.

При средней дозе внесения 100 кг/га урожайность составила: сорт Сельхоз – 11,4 т/га; сорт Версаль – 11,0 т/га; сорт Каррера – 11,7 т/га. Повышение урожайности при использовании беспилотной технологии в среднем составило 3,6 %; по сорту Версаль – 8,9 %, Каррера – 6,4. По сорту Сельхоз снижение на 1,8 %.

В результате проведенных исследований выполнена апробация беспилотной технологии внесения материалов при возделывания озимого ячменя с полученными данными урожайности на каждой делянке и затратам материалов.

Расчет экономической эффективности использования беспилотной технологии показал, что ее производительность меньше в 4 раза. При использовании данной технологии с дифференцированным внесением удобрений повысилась урожайность озимого ячменя на 3,6 % при уменьшении количества удобрений на 2 %. Расход горюче-смазочных материалов снизился в 1,4 раза, металлоемкость в 26,7 раза. Дополнительные капиталовложения при использовании наземной технологии составляют 4771 тыс. руб.

Директор учебно-опытного
хозяйства «Кубань», к.с.-х.н. Т. В. Логойда

Декан факультета агрономии и экологии
Кубанского ГАУ, к.с.-х.н., доцент А. А. Макаренко

Директор опытной станции
учебно-опытного хозяйства «Кубань» Л. В. Назаренко

Заведующий кафедрой эксплуатации
и технического сервиса Кубанского ГАУ
д.т.н., профессор Е. В. Труфляк

Заведующий кафедрой физики Кубанского ГАУ,
к.т.н., доцент Н. Ю. Курченко

Доцент кафедры физиологии и биохимии
растений Кубанского ГАУ, к.с.-х.н. Ю. В. Подушин

Аспирант кафедры эксплуатации
и технического сервиса Кубанского ГАУ Даду Монес М. Ю.

Утверждаю
Директор
ФГБНУ ФНЦБЗР

_____/Асатурова А.М./

«____»_____ 2021 г.

Утверждаю
Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ

_____/Кощаев А.Г./

«____»_____ 2021 г.

АКТ
внедрения научной разработки «Электроактиватор водных растворов для подготовки рабочего раствора гербицидов»

от 23.07.2021 г.

Краткое описание разработки: Предлагается способ получения рабочего раствора гербицидов с требуемыми характеристиками через управление параметрами и режимами работы электроактиватора воды. Активированный раствор (анолит и католит) улучшает растворимость гербицида и сокращает затраты на уничтожение сорной растительности путем уменьшения нормы применения используемого препарата. Также предполагается сочетание применения данной технологии с совмещением внесения рабочего раствора с беспилотного летательного аппарата несущем на борту бак с раствором емкостью от 10 до 30 литров.

Место проведения работ: ФГБНУ «Федеральный научный центр биологической защиты растений»

Время проведения работ: 31.05.2021-23.07.2021

Разработчик: ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет», кафедра Электрических машин и электропривода, к.т.н., доцент Курченко Н.Ю.

Исполнители: Оськин С.В., Курченко Н.Ю., Цокур Д.С. со стороны Кубанского ГАУ, Савва А.П. со стороны ФНЦБЗР.

Основание выполнения: Договор №1 о педагогической практике аспирантов, заключаемый между организацией, осуществляющей образовательную деятельность, и организацией, осуществляющей деятельность по профилю соответствующей образовательной программы от 02 апреля 2021 г.

Сведения о внедрении: Используемый препарат – Пульсар, химический класс – имидазолиноны. Норма применения 0,6; 0,8; 1,0 л/га. Расход рабочей жидкости 200 л/га. Количество опытных участков – 10. Площадь участка – 15 м2, трехкратная повторность. Использовали 2 вида электроактивированной воды с различной минерализацией и pH, водопроводную воду и один контрольный участок (без обработки). Электроактивированная вода имела следующие показатели:

Анолит – pH-6,5; минерализация – 0,29 ppt; электропроводность – 0,39 мСм/см.

Католит – pH-9,5; минерализация – 0,53 ppt; электропроводность – 1,1 мСм/см.

При внедрении разработки выполнены следующие работы: Для определение биологической эффективности проводили учет по массе сорной растительности на контрольном и опытных вариантах

Сведения об эффективности внедрения (биологическая, экономическая, социальная, экологическая и др.) наибольший процент гибели сорняков был получен при использовании электроактивированной воды и составил при норме применения 0,6 л\га; 0,8 л\га; 1 л\га соответственно, 54 %; 81%; 86% для анолита, 65%; 84%; 83% для католита в то время как эффективность использования воды без подготовки составила 39%, 69%, 78%.

ОТ ИСПОЛНИТЕЛЯ:

Зам. директора по научной работе
ФГБНУ ФНЦБЗР _____ Томашевич Н.С.

Зав. лабораторией гербологии
ФГБНУ ФНЦБЗР, к.б.н. _____ Савва А.П.

ОТ ЗАКАЗЧИКА:

Научный консультант
ФГБОУ ВО «КубГАУ»,
д.т.н., профессор _____ Оськин С.В.

Доцент кафедры ЭМ и ЭП
ФГБОУ ВО «КубГАУ», к.т.н. _____ Курченко Н.Ю.

Доцент кафедры ЭМ и ЭП
ФГБОУ ВО «КубГАУ», к.т.н. _____ Цокур Д.С.

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И. Т. ТРУБИЛИНА»

УТВЕРЖДАЮ:
Директор УОХ «Кубань»
_____ Т. В. Логойда
«____» _____2025 г.

УТВЕРЖДАЮ:
Проректор по научной работе
Кубанского ГАУ, профессор
_____ А. Г. Кощаев
«____» _____2025 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

«Исследование эффективности беспилотных авиационных систем в растениеводстве с применением электротехнологии для улучшения качества рабочего раствора пестицидов»

Научный руководитель, д. т. н.,
Профессор С. В. Оськин

Краснодар 2025

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:
заведующий кафедрой
электрических машин и
электропривода, профессор,
доктор технических наук — С. В. Оськин

Исполнители:

заведующий кафедрой физики,
к.т.н., доцент — Н.Ю. Курченко

доцент кафедры электрических
машин и электропривода к.т.н. — Д. С. Цокур

ассистент кафедры генетики,
селекции и семеноводства — Л.В. Назаренко

ассистент кафедры физики — М.А. Кубрак

соискатель — Е.Ю. Любимцева

УТВЕРЖДАЮ
и.о. директора ОСХ «Березанское»
_____/Матирный Н.А./
_____2022 г.

АКТ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ

технического предложения по использованию БАС для гербицидной обработки и внесения удобрений

Комиссия в составе главного агронома ОСХ «Березанское» Матирного Н.А., д.т.н., профессора, заведующего кафедрой ЭМ и ЭП КубГАУ Оськина С.В.; к.т.н., доцента, заведующего кафедрой физики КубГАУ Курченко Н.Ю. составила акт экспериментальной проверки технического предложения по использованию БАС для гербицидной обработки и внесения удобрений проводимой в рамках диссертационной работы Н.Ю. Курченко, на тему «Методы и средства повышения эффективности эксплуатации беспилотных авиационных систем в цифровом земледелии АПК».

Эксперимент по оценке эффективности применения БАС для гербицидной обработки и внесения удобрений проводился в опытно-семеноводческом хозяйстве (ОСХ) «Березанское». Дата проведения гербицидной обработки 25.04.2021г, внесение аммиачной селитры 11.09.2021г.

Сравнивались технология гербицидной обработки наземной техникой и с применением БАС. Использовалась наземная техника: трактор МТЗ 82 с опрыскивателем ОП 2000, ширина захвата 20 м. Расход дизельного топлива - 1.5 л\га (стоимость дизельного топлива 56 руб/литр), норма производительности работы - 160 га/смена (смена 8 часов). Беспилотный летательный аппарат применялся компании DJI, модель Agras T30. Гербицидная обработка проводилась препаратом «Голд Стар» (20–25 гр/га), норма расхода рабочей жидкости 200 л/га при внесении наземной техникой и 7 л/га при внесении с БАС. Сравнение производилось на двух полях по 160 га. Погодные условия в день обработки: температура воздуха от 12 до 16С, влажность 50-60%, скорость ветра до 3 м/с. Параметры обработки с БАС следующие: высота опрыскивания 3 м, при этом ширина захвата 9 м, производительность 3,5 га за вылет, среднее время одного вылета 10 минут, поле площадью 130 га обработали за 15 часов, интервал проведения работ с 4.00 утра до 2.00 утра с перерывом в обеденное время. Ресурс АКБ DJI T30 около 1000 циклов (~3000 га). БАС снабжался тремя АКБ для беспрерывного циклического режима проведения работ (стоимость одного АКБ 120 000 т.р.), расход топлива бензинового генератора 5 л/час при переменной нагрузке (АИ - 92, стоимость 47 р/л, замена моторного масла каждые 70 часов работы, объем масла 1,3 литра, стоимость 400 р/литр). Стоимость комплекта БАС DJI T30 с тремя АКБ и бензогенератором - 2 500 000 руб.

Так же использовался смесительный узел для приготовления рабочего раствора стоимостью 300 000 руб, включающий два бака объемом 250 и 500 литров для автономного смешивания и выдачи рабочего раствора. Для энергообеспечения собственных нужд смесительного узла (привод перемешивающих устройств) применялся бортовой бензиновый генератор мощностью 2,2 кВт (расход топлива 0,9 л/час, стоимость 25 000 руб).

После уборки пшеницы на поле остались растительные остатки. Культура следующего года – озимый ячмень. Для разложения растительных остатков под озимый ячмень проводили исследование по сравнению внесения селитры наземной техникой - норма внесения 100 кг/га, период проведения работ до сева. Использовался трактор МТЗ 82 с разбрасывателем минеральных удобрений, норма производительности работ - 45 га/смену (смена 8 часов). С помощью DJI T30 вносили по следам после уборки комбайна, за счет этого снижали норму внесения селитры до 50 кг/га, внесение производили на валок. Стоимость селитры 15 руб/кг. Опыт проводили на учетных площадках по 6,5 га. Наземной техникой внесено 650 кг, БАС – 325 кг.

Урожайность по пшенице составила 60,5 ц/га при обработке наземной техникой и 61,2 ц/га при обработке БАС. Урожайность по ячменю 71,6 ц/га при обработке наземной техникой и 72,2 ц/га при работе с БАС.

Выводы по результатам сравнения: по урожайности разница в обоих случаях несущественна (менее 1,2%); по экономическим затратам БАС даёт экономию в два раза по стоимости удобрений в конкретной операции за счёт двукратного снижения нормы внесения и значительной экономии на воде и логистике (32 000 л у наземной техники и 1 120 л при использовании БАС); по энергетическим затратам БАС в 3,3 раза энергоэффективнее наземной технологии (81,2 МДж/га у МТЗ 82 против 24,3 МДж/га для DJI T30. БАС позволяет гибко работать в любых условиях поля, проводить сплошные и дифференцированные обработки, в том числе по влажной почве избегая переуплотнения и потери урожая на колее техники (5-7%), повышает экологическую безопасность при возделывании культур. Применение БАС позволяет перераспределить ресурс существующего парка наземной техники на выполнение других технологических задач.

Методология определения оптимальных параметров полетного задания при проведении обработок с учетом погодных условий, состояния растений, типа препарата и технических характеристик предлагаемая Курченко Н.Ю. показала высокую эффективность.

Заведующий кафедрой ЭМ и ЭП,
д.т.н., профессор _____ /Оськин С.В./

Заведующий кафедрой физики,
к.т.н., доцент _____ /Курченко Н.Ю./

Главный агроном _____ /Матирный Н.А./



УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «АГРОДОМ»
_____/ Гашин Э. Ю. /
_____2022 г.

АКТ

Внедрения инновационной технологии возделывания риса с применением БАС

Комиссия в составе главного агронома Пономарева Р.В., д.т.н., профессора Кубанского ГАУ Труфляка Е.В., к.т.н., доцента Кубанского ГАУ Курченко Н.Ю. составила акт экспериментальной проверки инновационной технологии применения БАС при выращивании риса. Технология предусматривает замену традиционной техники на БАС при посеве, опрыскивании и внесении удобрений. Реализация технологии осуществлялась в пос. Светлый путь, Курчанского сельского поселения Темрюкского района Краснодарского края в два этапа: поисковый эксперимент и в реальных условиях.

На первом этапе были проведен поисковый эксперимент. Перед заливкой рисового чека проводилась обработка гербицидом сплошного действия с нормой 1,5 л/га, против просовидных сорняков. Опытный рисовый чек (5,7 га) заранее был заполнен водой на период 5 дней для провоцирования прорастания сорняков. Норма высева с БАС применялась 35 и 50 кг на гектар. Применяемый семенной материал, предварительно пророщенный в течении 2 суток, высевается с проснувшимся зародышем. 27.06.2021 г. проведена азотная подкормка. Для нормы высева 35 кг/га норма внесения удобрений – 80 кг/га карбамида, для нормы высева 50 кг/га норма внесения удобрений – 95 кг/га карбамида. Перед уборкой проводилась обработка десикантами с применением БАС. Урожайность для нормы высева 35 кг/га – 37 ц/га, для нормы высева 50 кг/га – 42 ц/га.

На втором этапе проводились исследования применения БАС в технологии высева и обработок риса. Цель эксперимента – определение нормы высева риса с применяем БАС. Техника, используемая в опыте: БАС DJI T40 – емкость бака для сыпучих материалов – 70 литров, норма высева – 180 кг/га; БАС DJI T20 – емкость бака для сыпучих материалов – 20 литров, норма высева – 160 кг/га; БАС JOYANCE – емкость бака для сыпучих материалов – 30 литров, 21 кг сыпучих материалов, норма высева – 160 кг/га. Сравнение производили с классической технологией, норма высева 300 кг/га, скорость

работы при высеве – 14 км/час. Масса посевного материала в баке – 43 кг. Время выработки бака – 1,5 мин, площадь посева – 0,23 га, норма высева – 180 кг/га, высота полета – 5 м, ширина захвата – 8 м. Среднее число вылетов на одном цикле заряда АКБ – 3 полета (в зависимости от карты чеков). Для заряда АКБ примелся бензогенератор, расход топлива – 30 л/смену, смена – 8 часов. Среднее время обработки чека площадью 5 га – 1 час. При этом отсутствует деформация микрорельефа чека колесами техники.

Для оценки распределения семян применяли рамку 1000х1000 мм на этапе сева и всходов. Внесений удобрений на опытных участках проводили с применением БАС. Проводили две подкормки карбамидом в фазах 3-4 и 8-9 настоящих листьев. Внесение СЗР проводилось с применением БАС DJI T20 и JOYANCE. Примелся почвенный гербицид, гербицид сплошного действия, селективные гербициды, инсектициды, фунгициды и десиканты. Скорость ветра при обработке – 0 м/с, температура – 22,5 С, влажность воздуха – 64 %. Расход рабочей жидкости – 8 л/га, высота обработки – 3 м, ширина захвата – 5,5 м, скорость обработки – 20 км/ч.

Замена сеялки на БАС снижает норму высева с 300 до 160–180 кг/га, что даёт экономию 4 200–4 900 руб/га на семенах. Дополнительная урожайность (до 8,2 ц/га) приносит до 1 476 руб/га дополнительной выручки. Отказ от дизельного топлива на высеве (60–90 л/га) экономит 3 600–5 400 руб/га, а сокращение расхода рабочей жидкости с 200 до 8 л/га снижает затраты воду ещё на ~300–500 руб/га. Итоговая экономия на 1 га — от 8 000 до 12 000 рублей. На обработках экономия топлива за счёт снижения энергозатрат с 500 до 15 МДж/га эквивалентна экономии ~400 руб/га в пересчёте на условное топливо. Общая энергетическая экономия в денежном эквиваленте — более 10 000 руб/га при полном цикле (посев + обработки).

главный агроном  /Пономарев Р.В./

д.т.н., профессор  /Труфляк Е.В./

к.т.н., доцент  /Курченко Н.Ю./

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

ООО «ПСК ПЛАСТМЕТАЛЛ»

/С. А. Набатников/

2018 г.

АКТ

Внедрения программного обеспечения для обработки изображений полученных беспилотным летательным аппаратом (БПЛА).

Мы, нижеподписавшиеся, с одной стороны Оськин С.В., Курченко Н.Ю., Ильченко Я.А. и Болотин Г.Ю., Галкин Н.В. с другой, составили настоящий акт в том, что разработанное программное обеспечение (ПО) в Кубанском ГАУ внедрено на ООО «ПСК ПЛАСТМЕТАЛЛ» для обработки изображений полученных БПЛА.

Разработанное программное обеспечение позволяет строить карты из полученных снимков с помощью БПЛА. Количество снимков – до 1000 для одной карты. Полученное ешитое изображение накладывается на off-line карту местности по GPS меткам присваиваемым каждому кадру.

Разработанное ПО позволяет строить объемную модель рельефа местности, разрезы рельефа для определения перепада высот, производить расчеты длин и площадей участков, ставить метки с координатами.

Для обработки изображения используются RGB фильтры. Данное решение, программно, позволяет определить цветовые неравномерности посевов и как результат служить инструментом расчета индекса роста растений (NDVI).

Внедряемое ПО так же позволяет сохранять изображения в форматах: .GeoTIFF, .PNG, .MBTTiles, .LAZ, .PLY и др., строить карты задания для дифференцированного внесения удобрений.

ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ

_____ /Оськин С.В./

_____ /Ильченко Я.А./

_____ /Курченко Н.Ю./

ООО «ПСК ПЛАСТМЕТАЛЛ»

_____ /Болотин Г.Ю./

_____ /Галкин Н.В./

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор
ООО «ПСК ПЛАСТМЕТАЛЛ»
_____ /С. А. Набатников/
_____ 2018 г.

АКТ

Внедрения эскизной конструкторской документации рабочего органа в виде опрыскивателя для беспилотного летательного аппарата (БПЛА).

Мы, нижеподписавшиеся, с одной стороны Оськин С.В., Курченко Н.Ю., Ильченко Я.А. и Болотин Г.Ю., Галкин Н.В. с другой, составили настоящий акт в том, что разработанная в Кубанском ГАУ эскизная конструкторская документация рабочего органа для БПЛА в виде опрыскивателя внедрена с целью дальнейшего серийного производства на ООО «ПСК ПЛАСТМЕТАЛЛ».

Разработана эскизная конструкторская документация рабочего органа для БПЛА в виде опрыскивателя. Предполагаемые технические характеристики БПЛА и опрыскивателя: общий вес (без батарей) - 8,8 кг; стандартный взлетный вес - 22,5 кг; время полета - 15 мин; полезная нагрузка - 10 кг; емкость бака - 10 литров; скорость обработки - 3 га в час, количество форсунок – 4.

Определена экономическая эффективность внедрения БПЛА с рабочим органом в виде опрыскивателя для внесения пестицидов в очаги распространения болезней, сорняков и вредителей. Экономия финансовых затрат по сравнению с использованием прицепного опрыскивателя составляет 20 % в первый год с учетом затрат на приобретение БПЛА и рабочего органа, в последующие годы 70%.

ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ

_____ /Оськин С.В./
_____ /Ильченко Я.А./
_____ /Курченко Н.Ю./

ООО «ПСК ПЛАСТМЕТАЛЛ»

_____ /Болотин Г.Ю./
_____ /Галкин Н.В./

АКТ
о выполнении договора

г. Краснодар «___» _____ 202_ г.

Код конкурса: МФИ-П-20.1
Наименование конкурса: конкурс научных проектов междисциплинарных фундаментальных исследований, ориентированных на задачи предприятий
Наименование проекта: Исследования методов проектирования на основе моделирования основных физических процессов в сложных электроэнергетических конструкциях (*в соответствии с Договором)* (далее – проект)

Унитарная некоммерческая организация «Кубанский научный фонд», именуемая в дальнейшем «Кубанский научный фонд», в лице директора Анисимова Виктора Владимировича, действующего на основании Устава, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина», именуемое в дальнейшем «Организация», в лице проректора по научной работе Кощаева Андрея Георгиевича., действующего на основании доверенности от 25.05.2020 г. № 01-235, именуемое в дальнейшем «Организация», ООО «СПЕЦ» именуемое в дальнейшем «Предприятие», в лице генерального директора Асеева Алексея Геннадьевича, действующего на основании *Устава, Руководителя проекта Оськина Сергея Владимировича*, совместно именуемые «Стороны», составили настоящий акт о нижеследующем:

1. В соответствии с условиями Договора от 07 декабря 2020 г. № МФИ-П-20.1-45/20 Руководитель проекта, Организация передает, а Кубанский научный фонд и Предприятие принимают следующие отчетные документы: научный отчет, показатели качества проекта, финансовый отчет в количестве _____.[2]

2. Стоимость расходов, произведенных на реализацию проекта, за счет средств целевого финансирования, предоставленных Кубанским научным фондом, составляет: 1 000 000,00 (один миллион рублей ноль копеек) рублей.

Стоимость расходов, произведенных на реализацию проекта, за счет средств целевого финансирования, предоставленных Предприятием, составляет: 1 000 000,00 (один миллион рублей ноль копеек) рублей.

3. Настоящий акт является основанием для проведения взаимных расчетов между Сторонами.

4. По существу выполненных работ по проекту в рамках реализации проекта Стороны (имущественных и неимущественных претензий друг к другу не имеют.

5. Акт составлен в четырех экземплярах.

Проректор по научной работе
ФГБОУ ВО Кубанский ГАУ
_____ А.Г. Кощаев

Директор унитарной некоммерческой
организации «Кубанский научный фонд»
_____ В.В. Анисимов

[2] Перечисляются отчетные документы, в соответствии с условиями договора, их количество и формат.

Руководитель Предприятия
_____/ А.Г. Асеев/

АКТ
внедрения результатов научного проекта

г. Краснодар «___» _____ 202_ г.

Код конкурса: МФИ-П-20.1

Наименование конкурса: конкурс научных проектов междисциплинарных фундаментальных исследований, ориентированных на задачи предприятий Наименование проекта: Исследования методов проектирования на основе моделирования основных физических процессов в сложных электроэнергетических конструкциях (далее –проект)

Унитарная некоммерческая организация «Кубанский научный фонд», именуемая в дальнейшем «Кубанский научный фонд», в лице директора Анисимова Виктора Владимировича, действующего на основании Устава, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина», именуемое в дальнейшем «Организация», в лице проректора по научной работе Кощаева Андрея Георгиевича, действующего на основании доверенности от 25.05.2020 г. № 01-235, именуемое в дальнейшем «Организация», ООО «СПЕЦ» именуемое в дальнейшем «Предприятие», в лице генерального директора Асеева Алексея Геннадьевича, действующего на основании *Устава, Руководителя проекта Оськина Сергея Владимировича*, совместно именуемые «Стороны», составили настоящий акт о нижеследующем:

1. В соответствии с условиями Договора от 07 декабря 2020 г. № МФИ-П-20.1-45/20 Руководитель проекта, Организация передает, а Кубанский научный фонд и Предприятие принимают результаты работы в виде отчета и программных продуктов.

2. Стоимость расходов, произведенных на реализацию проекта, за счет средств целевого финансирования, предоставленных Кубанским научным фондом, составляет: 1 000 000,00 (один миллион рублей ноль копеек) рублей.

Стоимость расходов, произведенных на реализацию проекта, за счет средств целевого финансирования, предоставленных Предприятием, составляет: 1 000 000,00 (один миллион рублей ноль копеек) рублей.

Руководитель проекта
_____/С.В. Оськин/
Исполнители проекта
_____ /Д.С. Цокур/, _____ /Н.С. Курченко/
_____ /В.А. Дидыч/, _____ /Я.А. Ильченко/
_____ /Н.С. Баракин/

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.Т.ТРУБИЛИНА»

СПРАВКА

04.04. 2023 года

Дана КУРЧЕНКО Николаю Юрьевичу и подтверждает, что с 2018 по 2021 годы он принимал участие в выполнении научно-исследовательских работ по государственному заданию Минсельхоза РФ федеральному государственному бюджетному образовательному учреждению высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" за счет средств федерального бюджета по теме: "Прогнозирование и мониторинг научно-технического развития АПК: технологии точного сельского хозяйства, автоматизации и роботизации».

В 2022 году он принимал участие в выполнении тематики: "Предикционный анализ научно-технологического развития агропромышленного комплекса в области технологии точного сельского хозяйства, автоматизации и роботизации", также в рамках госзадания Минсельхоза РФ. Ежегодный объем финансирования научно-исследовательских работ составлял 1 млн. рублей.

Работы выполнены в полном соответствии с техническими заданиями, приняты и оплачены заказчиком в полном объеме.

Начальник отдела
сопровождения грантов и НИР Е.М. Сорочинская

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.Т.ТРУБИЛИНА»

С П Р А В К А

04.04. 2023 года

Выдана КУРЧЕНКО Николаю Юрьевичу и подтверждает, что в 2023 году он принимал участие в выполнении научно-исследовательских работ федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" по заказу Минсельхоза России за счет средств федерального бюджета по теме: "Предикционный анализ научно-технологического развития агропромышленного комплекса в области технологии точного сельского хозяйства, автоматизации и роботизации".

Работы выполнены в полном объеме.

Доля участия в выполнении работ КУРЧЕНКО Николаем Юрьевичем составила 212 971,00 рублей.

Начальник отдела
сопровождения грантов и НИР Е.М. Сорочинская

8(861) 221-58-15
Чернова Н.В.

Экономист
Н.В. Чернова
Пр-№ 540 от

Общество с ограниченной ответственностью «Школа беспилотной авиации»
ИНН/КПП 3906391119/390601001, ОГРН 1203900005320, адрес: 236022, г. Калининград, пр-т Советский, д. 18, помещение II, этаж 1, www.uavprof.com, e-mail: info@uavprof.com, тел: 8 800 300 28 87

20.04.2026

АКТ

об использовании в учебном процессе

результатов научно-исследовательской работы Н.Ю. Курченко

Общество с ограниченной ответственностью «Школа беспилотной авиации» подтверждает, что результаты диссертационной работы Курченко Н.Ю. нашли свое применение в образовательном процессе в соответствии с отраслевым заказом, потребностями компаний на подготовку кадров для разработки, производства и эксплуатации беспилотных авиационных систем в рамках федерального проекта «Кадры для беспилотных авиационных систем» национального проекта «Беспилотные авиационные системы».

Слушатели (30 человек) отметили высокую квалификацию Курченко Н.Ю. как инструктора и профессионализм, проявленные в ходе проведения обучения.

Генеральный директор _____ Кириков Д.В.

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.Т. ТРУБИЛИНА»

Проректор по учебной работе
_____Петух А.В.
«___» _____2026 г.

АКТ

об использовании в учебном процессе
результатов научно-исследовательской работы Н.Ю. Курченко

Комиссия в составе:

председатель – Ясменко Г.Н., начальник центра дополнительного образования, к.э.н.;

члены комиссии: Курзин Н.Н., профессор кафедры физики, д.т.н.; Шевченко А.А., декан факультета энергетики, к.т.н.

рассмотрела результаты научно-исследовательской работы Н.Ю. Курченко, выполненной на тему «Методы и средства повышения эффективности эксплуатации беспилотных авиационных систем в цифровом земледелии АПК» и возможность их использования в учебном процессе.

Комиссия отмечает, что результаты диссертационной работы Курченко Н.Ю. в период 2020-2026 гг. активно использовались в подготовке учебных материалов и внедрялись в образовательный процесс по программ дополнительного профессионального образования «Оператор дронов гражданского назначения», «Основы эксплуатации беспилотных летательных аппаратов», программы профессионального обучения «Внешний пилот беспилотных воздушных судов (с максимальной взлётной массой 30 кг и менее)», в том числе реализуемых на основании договоров о сетевом взаимодействии с ООО «Школа беспилотной авиации» (г. Калининград), ООО «Нетология» (г. Москва), а также для подготовки учебных материалов и видео-контента по образовательным программ в рамках проекта «Цифровая кафедра», использовались в процессе подготовки учителей агротехнологических классов.

Общий объем привлеченных средств от реализации программ составил 2 230 тыс. руб., число обученных – более 300 чел.

Председатель комиссии _____ Г.Н. Ясменко

Члены комиссии _____ А.А. Шевченко

_____ Н.Н. Курзин

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.Т. ТРУБИЛИНА»

Проректор по учебной работе
_____Петух А.В.
«____»_____2026 г.

АКТ

об использовании в учебном процессе
результатов научно-исследовательской работы Н.Ю. Курченко

Комиссия в составе:

председатель – Шевченко А.А., декан факультета энергетики, к.т.н.;

члены комиссии – Курзин Н.Н., профессор кафедры физики, д.т.н.; Емелин А.В., доцент кафедры физики, к.т.н.

рассмотрела результаты научно-исследовательской работы Н.Ю. Курченко, выполненной на тему «Методы и средства повышения эффективности эксплуатации беспилотных авиационных систем в цифровом земледелии АПК» и возможность их использования в учебном процессе.

Комиссия установила, что материалы научно-исследовательской работы Н.Ю. Курченко 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 физике при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Агроинженерия» «Природообустройство и водопользование», «Землеустройство и кадастры», «Строительство».

Комиссия считает, что включенные в образовательные дисциплины материалы научно-исследовательской работы соответствуют требованиям государственных образовательных стандартов.

Председатель комиссии: _____ А.А. Шевченко

Члены комиссии: _____ Н.Н. Курзин

_____ А.В. Емелин

ПРИЛОЖЕНИЕ Е
Свидетельства о государственной регистрации интеллектуальной собственности



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2793489

Многофункциональная беспилотная летающая система для опрыскивания растений в труднодоступных местах

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)***

Автор(ы): ***Курченко Николай Юрьевич (RU)***

Заявка № **2022127384**
Приоритет изобретения **19 октября 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **04 апреля 2023 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **19 октября 2042 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2789929

Беспилотный летающий опрыскиватель

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)***

Автор(ы): ***Курченко Николай Юрьевич (RU)***

Заявка № **2022125755**
Приоритет изобретения **29 сентября 2022 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **14 февраля 2023 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **29 сентября 2042 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2775478

Асинхронный генератор с переключаемой обмоткой статора по схеме треугольник - звезда в двойную звезду

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)***

Авторы: ***Оськин Сергей Владимирович (RU), Баракин Николай Сергеевич (RU), Цокур Дмитрий Сергеевич (RU), Курченко Николай Юрьевич (RU), Ильченко Яков Андреевич (RU), Дидыч Виктор Александрович (RU)***

Заявка № **2021123615**
Приоритет изобретения **05 августа 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **01 июля 2022 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **05 августа 2041 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2634277

Способ борьбы с сорной растительностью

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)***

Авторы: ***Оськин Сергей Владимирович (RU), Цокур Дмитрий Сергеевич (RU), Курченко Николай Юрьевич (RU)***

Заявка № **2016148776**
Приоритет изобретения **12 декабря 2016 г.**
Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **24 октября 2017 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **12 декабря 2036 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

08 -11- 2017

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2777466

Способ борьбы с сорной растительностью при выращивании бобовых культур

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)***

Авторы: ***Курченко Николай Юрьевич (RU), Оськин Сергей Владимирович (RU), Цокур Дмитрий Сергеевич (RU), Савва Анатолий Павлович (RU), Баракин Николай Сергеевич (RU), Нагучев Заур Хамедович (RU), Цокур Екатерина Сергеевна (RU)***

Заявка № **2021133217**
Приоритет изобретения **15 ноября 2021 г.**
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации **04 августа 2022 г.**
Срок действия исключительного права
на изобретение истекает **15 ноября 2041 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

4960

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2644472

Проточный электроактиватор воды

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)***

Авторы: ***Оськин Сергей Владимирович (RU), Цокур Дмитрий Сергеевич (RU), Курченко Николай Юрьевич (RU)***

Заявка № **2016148774**
Приоритет изобретения **12 декабря 2016 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **12 февраля 2018 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **12 декабря 2036 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

вх. 21.02.18

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2688183

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ЭЛЕКТРОЛИЗА ВОДНЫХ РАСТВОРОВ

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)***

Авторы: ***Богатырев Николай Иванович (RU), Оськин Сергей Владимирович (RU), Курченко Николай Юрьевич (RU), Моргун Сергей Михайлович (RU), Семернина Дарья Дмитриевна (RU)***

Заявка № **2018112058**
Приоритет изобретения **03 апреля 2018 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **21 мая 2019 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **03 апреля 2038 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

5011

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2643839

Способ посева овощных культур

Патентообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина" (RU)***

Авторы: ***Труфляк Евгений Владимирович (RU), Метлев Иван Владимирович (RU), Скоробогаченко Иван Сегреевич (RU), Курченко Николай Юрьевич (RU)***

Заявка № **2017112575**
Приоритет изобретения **12 апреля 2017 г.**
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **06 февраля 2018 г.**
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **12 апреля 2037 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

20 -02- 2018

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2026618410

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)

Правообладатель: ***Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Калмыцкий государственный университет имени Б.Б. Городовикова» (RU)***

Авторы: ***Курченко Николай Юрьевич (RU), Эвиев Валерий Андреевич (RU), Буханцов Кирилл Николаевич (RU), Лебедев Анатолий Тимофеевич (RU), Сангаджиева Саглара Александровна (RU)***

Заявка № **2026616694**
Дата поступления **14 марта 2026 г.**
Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ ***25 марта 2026 г.***

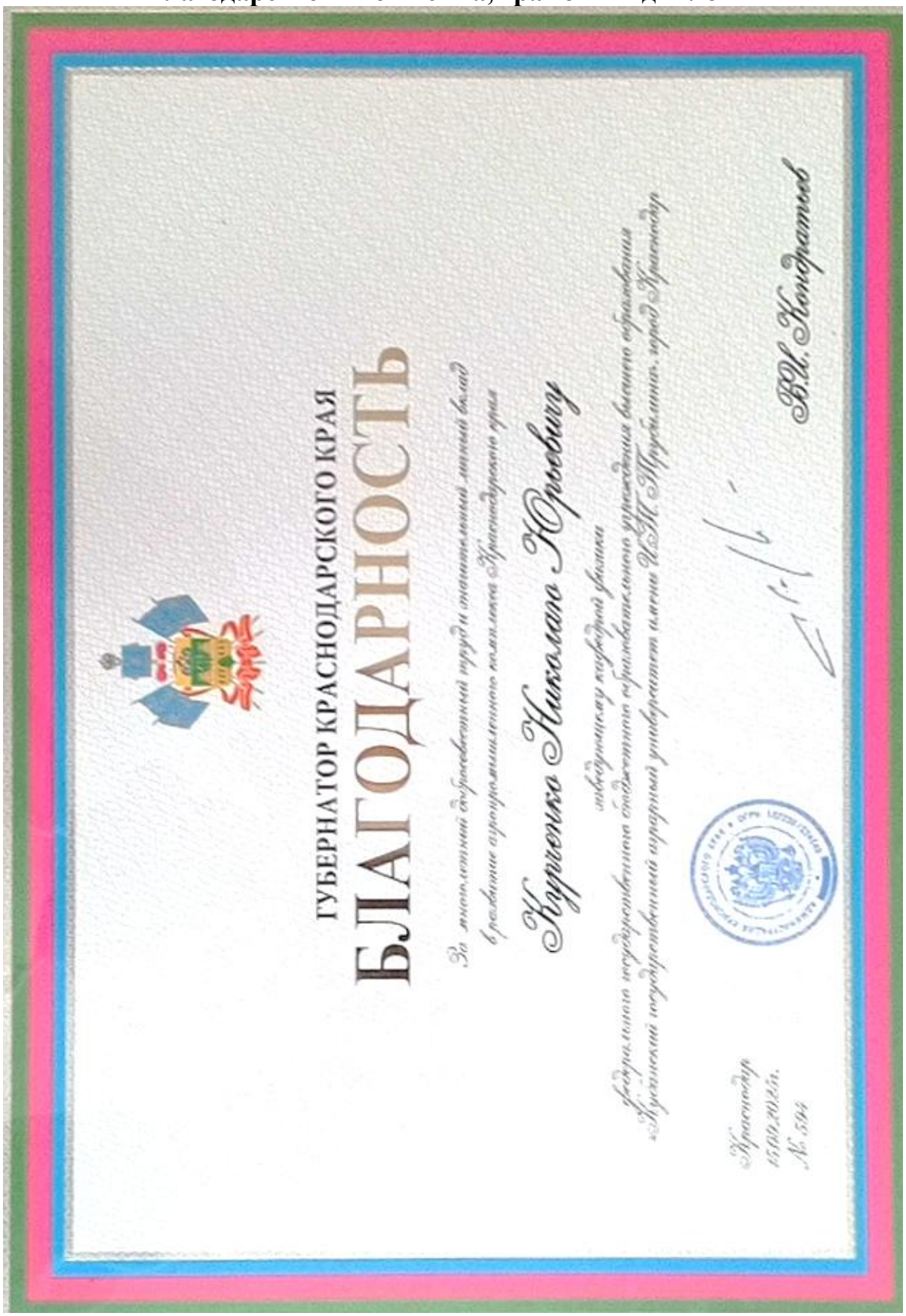
Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 00a570e4f7add8d531b4b8818e75f29506
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 04.09.2025 по 28.11.2026

Ю.С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Благодарственные письма, грамоты и дипломы



БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО ПОСТОЯННОГО КОМИТЕТА ЗАКОНОДАТЕЛЬНОГО СОБРАНИЯ КРАСНОДАРСКОГО КРАЯ

КУРЧЕНКО

Николаю Юрьевичу

заведующему кафедрой физики
ФГБОУ ВО "Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина"

за особые заслуги в области науки и реализации молодежной политики

Председатель комитета по физической культуре, спорту, делам молодежи и взаимодействию с общественными объединениями — *А.В. Маковеев*

2023 год

Администрация муниципального образования город Краснодар
Городская Дума Краснодара

ПОЧЁТНАЯ ГРАМОТА

НАГРАЖДАЕТСЯ

КУРЧЕНКО
НИКОЛАЙ ЮРЬЕВИЧ

ДОЦЕНТ КАФЕДРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН И ЭЛЕКТРОПРИВОДА ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ И.Т.ТРУБИЛИНА»

за большой вклад в развитие учебной, научной, методической, педагогической, инновационной деятельности и с связи со 100-летием со дня основания учреждения

Первый заместитель главы муниципального образования город Краснодар

М.С.Слюсарев

Первый заместитель председателя городской Думы Краснодара

Г.А.Ермакова

Краснодар
2022