

На правах рукописи

АБДРАХИМОВ ДАНИИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ НА
ОСНОВЕ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И
ИНФРАКРАСНОЙ СИСТЕМЫ ДЕТЕКЦИИ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для
агропромышленного комплекса

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва — 2025

Работа выполнена на кафедре тракторов и автомобилей ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель:

Степанцевич Марина Николаевна,
кандидат экономических наук,
доцент, доцент кафедры прикладной
информатики ФГБОУ ВО
«Российский государственный
аграрный университет – МСХА имени
К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты:

Ивашук Ольга Александровна,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных
и робототехнических систем ФГАОУ
ВО «Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет»

Гончаров Роман Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Цифровое управление
процессами в АПК» ФГБОУ ВО
«Саратовский государственный
университет генетики, биотехнологии
и инженерии имени Н.И. Вавилова»

Ведущая организация:

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

Защита состоится 24 декабря 2025 г. в 10:00 на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел: +7 (499) 976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке имени Н. И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева» и на сайте Университета www.timacad.ru.

Автореферат разослан _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
35.2.030.03

Н.Н. Пуляев

Общая характеристика работы

Современное животноводство требует внедрения эффективных, автоматизированных и надежных систем идентификации животных, обеспечивающих точный учет и мониторинг поголовья. Традиционные методы, такие как татуировки, бирки и чипирование, обладают рядом недостатков — от низкой надежности и риска потери идентификатора до инвазивности и ограничения объема передаваемой информации. В условиях интенсивного сельского хозяйства эти недостатки снижают оперативность управления и усложняют контроль за состоянием животных. Инфракрасные технологии в сочетании с методами искусственного интеллекта способны не только распознавать животных в режиме реального времени, но и анализировать их физиологическое состояние. Настоящая работа направлена на исследование и разработку интеллектуальной системы идентификации животных, основанной на инфракрасной детекции и алгоритмах машинного обучения. Разработка ориентирована на практическое применение в агропромышленном секторе и призвана повысить эффективность в сфере животноводства.

Таким образом, была создана система, которая сочетает в себе автоматизированную высокоточную детекцию, низкие эксплуатационные издержки и простоту интеграции в существующую инфраструктуру сельскохозяйственных предприятий, предлагая сбалансированное решение между дорогими интеллектуальными системами и устаревшими ручными методами.

Степень разработанности. Большой вклад в исследование процессов автоматизации процессов сельскохозяйственного производства внесли следующие ученые: О.Н. Дидманидзе, В.В. Кирсанов, С.Н. Девянин, Н.Н. Пуляев, А.А. Манохина, О.А. Леонов, А.С. Дорохов, О.А. Ивашук, Н.В. Алдошин и другие. В их работах рассмотрены ключевые подходы к автоматизации ведения сельского хозяйства.

Актуальность темы. Актуальность работы обусловлена необходимостью модернизации процессов идентификации сельскохозяйственных животных в условиях стремительного развития цифровых технологий и автоматизации в агропромышленном комплексе. Традиционные методы не обеспечивают достаточной точности и оперативности при масштабном мониторинге поголовья, особенно на крупных фермах. В этом контексте инфракрасные технологии в сочетании с алгоритмами искусственного интеллекта открывают новые возможности для бесконтактной, высокоточной и автоматизированной идентификации животных. Такая интеграция позволяет не только повысить точность учета и мониторинга, но и сократить стресс у животных, минимизировать человеческий фактор и повысить производственную эффективность. Разработка и внедрение интеллектуальных

систем идентификации становятся важным шагом к цифровизации аграрного сектора и повышению его технологического уровня.

Целью данной работы является создание интеллектуальной системы идентификации сельскохозяйственных животных на основе методов искусственного интеллекта и инфракрасной детекции для повышения эффективности животноводческой отрасли.

Задачи исследования:

1. Проанализировать современные подходы к идентификации сельскохозяйственных животных, выявив их преимущества и ограничения с точки зрения точности, удобства использования и экономической эффективности.
2. Исследовать потенциал применения инфракрасных технологий для бесконтактной идентификации животных, рассматривая физические параметры теплового излучения, особенности диапазонов инфракрасного спектра и возможные варианты конструкции инфракрасных меток.
3. Разработать подход к формированию обучающего датасета на основе тепловых изображений животных с необходимой разметкой, обеспечивающей возможность эффективного обучения моделей компьютерного зрения.
4. Изучить и обосновать выбор нейросетевых архитектур таких, как YOLO, EfficientDet и другие, наилучшим образом подходящих для решения задач детекции и идентификации животных по инфракрасным изображениям.
5. Провести обучение и тестирование выбранной модели, оценив её точность, производительность и устойчивость к внешним воздействиям (освещение, загрязненность).
6. Создать экспериментальный прототип системы, включающей в себя инфракрасную камеру, модуль обработки и хранения данных, а также программное обеспечение на основе обученной нейросети.
7. Выполнить лабораторные и производственные испытания прототипа, проанализировать его функциональность, надёжность и точность работы.
8. Провести технико-экономическую оценку внедрения разработанной системы, включая расчёт затрат на оборудование, эксплуатационные расходы и эффективность от повышения качества мониторинга.

Внедрение интеллектуальной системы позволит значительно повысить эффективность управления поголовьем, улучшить процессы учета и мониторинга, а также оптимизировать логистические и производственные цепочки в животноводческой индустрии. Таким образом, интеграция искусственного интеллекта и инфракрасной детекции открывает новые

возможности для повышения продуктивности и устойчивого развития сельского хозяйства.

Предмет и объект исследования. Объектом исследования является процесс автоматизированной идентификации и мониторинга поголовья сельскохозяйственных животных. Предмет исследования — методика и программно-аппаратная реализация интеллектуальной системы идентификации, основанной на анализе инфракрасных изображений с применением алгоритмов машинного обучения.

Научная новизна. Разработана оригинальная автоматизированная система идентификации сельскохозяйственных животных на основе технологий инфракрасной детекции и алгоритмов искусственного интеллекта.

Теоретическая и практическая значимость:

1. Система применима для идентификации и отслеживания состояния большинства сельскохозяйственных животных.
2. Разработанные алгоритмы и программное обеспечение способствуют повышению эффективности мониторинга сельскохозяйственных животных.
3. Модульная архитектура разработанной системы позволяет легко встраивать ее в информационную систему большинства сельскохозяйственных предприятий без необходимости радикального переоснащения или изменения технологических процессов.
4. Система позволяет отслеживать уникальные идентификаторы и ключевые характеристики отдельных особей, что подтверждается комплексной оценкой работоспособности системы в ООО «Башкирская мясная компания» и ООО «Агромилк» с учетом факторов, влияющих на тепловую сигнатуру животных.

Методология и методы исследования. В настоящей работе использовались:

1. Методы искусственного интеллекта и машинного обучения — применялись для разработки и обучения нейросетевых моделей (в частности, YOLO) с целью автоматической детекции и идентификации животных по инфракрасным изображениям.
2. Методы компьютерного зрения — использовались для обработки видеопотока и выделения объектов (животных) на фоне, а также для сопоставления визуальных и тепловых признаков с индивидуальными идентификаторами.
3. Методы тепловизионного анализа — применялись для изучения характеристик инфракрасного излучения животных и оптимального размещения инфракрасных меток, обеспечивающих устойчивую идентификацию.
4. Методы цифровой обработки изображений — использовались для предобработки данных (нормализация, увеличение контрастности,

фильтрация «шумов»), а также для выделения ключевых признаков на инфракрасных изображениях.

5. Методы прототипирования аппаратно-программных систем — использовались при сборке и отладке системы, включающей тепловизионную камеру, вычислительный модуль и программное обеспечение.
6. Методы экспериментальных исследований — применялись при лабораторных и производственных испытаниях системы с целью верификации точности, надежности и устойчивости работы в условиях животноводческого предприятия.
7. Методы сравнительного анализа — использовались для сопоставления предложенной системы с традиционными методами идентификации (бирки, RFID, чипирование) по ключевым критериям: точность, стоимость, удобство, масштабируемость.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная интеллектуальная система идентификации сельскохозяйственных животных, основанная на интеграции инфракрасной детекции и алгоритмов искусственного интеллекта, обеспечивающая бесконтактную, точную и автоматизированную идентификацию.
2. Методика формирования обучающего датасета тепловых изображений животных с разметкой инфракрасных меток, пригодная для обучения нейросетевых моделей детекции и распознавания в инфракрасном диапазоне.
3. Результаты оценки технико-экономической эффективности применения системы идентификации сельскохозяйственных животных с помощью искусственного интеллекта и инфракрасной системы детекции.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием адекватных подходов к решению поставленных задач. Полученные результаты соответствуют данным наблюдений, а также согласуются с результатами, которые получены другими авторами с применением альтернативных методов детекции.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях и научных форумах: Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 80-летию высшего землеустроительного образования в Пермском крае, Международная научно-практическая конференция в Твери «Развитие научно-инновационного потенциала аграрного производства: проблемы, тенденции, пути решения», Международная научно-практическая конференция «Цифровые компетенции – сельскому хозяйству», г. Москва. Система апробирована в ООО «Башкирская мясная компания», ООО «Агромилк», получена положительная обратная связь о работе системы от представителей агробизнеса.

Результаты работы представлены международному сообществу на конференции BRICS Industrial Innovation Contest 2024 в Китае и отмечены как выдающийся проект в области автоматизации животноводства. Система была продуктивизирована и представлена на конкурсе «Студенческий стартап 2023» и признана победителем по направлению «Цифровые технологии».

Личный вклад. Автор лично проводил анализ литературных и натурных данных, активно участвовал в постановке цели и задач исследования, строил модели, разрабатывал систему, обрабатывал и анализировал результаты, формулировал выводы. Представленные автором теоретические аспекты и модели оригинальны. Автор активно участвовал в подготовке публикаций, а также докладов на научных конференциях.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 4 печатных изданиях, 2 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 2 — в тезисах докладов. Зарегистрированы 3 программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения. Полный объем диссертации составляет 152 страницы, включая 32 рисунка и 12 таблиц. Список литературы содержит 113 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы, перечисляются основные методы исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена всестороннему обоснованию актуальности разработки и внедрения современных интеллектуальных систем идентификации животных в контексте стремительного развития цифровых технологий в агропромышленном комплексе. Рассматриваются традиционные методы маркировки сельскохозяйственных животных. Несмотря на широкое распространение, указанные технологии обладают рядом существенных недостатков: ограниченная надёжность, необходимость прямого физического контакта, потенциально вызывающего стресс у животных, а также высокая трудоёмкость и зависимость от человеческого фактора.

В работе обоснована перспективность использования инфракрасной идентификации, основанной на бесконтактных и неинвазивных принципах детекции, обеспечивающих высокую точность распознавания и безопасность для животных. Направления применения инфракрасной идентификации в агропромышленном секторе представлены в таблице 1. Описаны физические основы функционирования инфракрасных

Таблица 1 — Направления применения инфракрасной идентификации в АПК

Направление применения	Конкретные задачи и преимущества
Идентификация и учет животных	– Уникальная маркировка – Контроль перемещений – Ведение племенного учета и родословных
Автоматизация процессов	– Автоматизация доения (учет надоев, контроль здоровья) – Контроль кормления – Автоматическая сортировка по весу и состоянию
Мониторинг состояния животных	– Отслеживание активности для выявления болезней – Раннее обнаружение патологий
Управление логистикой и происхождением	– Прослеживаемость происхождения продукции – Контроль перемещений при транспортировке – Обеспечение санитарной безопасности

систем, возможности спектрального анализа теплового излучения и их интеграция с технологиями искусственного интеллекта. Особое внимание уделено применению методов компьютерного зрения и нейросетевых архитектур, таких как YOLO, Faster R-CNN и EfficientDet, для автоматического распознавания животных на инфракрасных изображениях. Подчеркивается потенциал синергии между инфракрасными сенсорными системами и алгоритмами машинного обучения для создания адаптивных и самообучающихся решений в области зоотехнического мониторинга. Подход к идентификации сельскохозяйственных животных с помощью искусственного интеллекта и инфракрасной системы детекции обеспечивает бесконтактный и высокоточный мониторинг особей (точность до 98%), позволяя реализовать автоматизированный учёт поголовья, а также раннюю диагностику заболеваний. Подчеркиваются ключевые преимущества

разработанной системы: снижение операционных затрат, минимизация вмешательства человека, повышение уровня биобезопасности и соответствие принципам гуманного животноводства. Результаты теоретического обоснования и предварительного анализа были опубликованы в работе.

Вторая глава содержит комплексное теоретическое исследование применимости системы идентификации и развивает математико-алгоритмическую базу проекта. Прежде всего, производится критический анализ научной литературы и существующих решений в области инфракрасной идентификации и компьютерного зрения, после чего формулируются принципы интеграции технологии искусственного интеллекта в задачи обработки тепловизионных данных. Особое внимание уделяется выбору и



Рисунок 1 — Пример изображения для обучения модели детекции, полученного на производстве

обоснованию архитектурных решений для построения моделей глубокого обучения. Описывается методология сбора таргетированного датасета для обучения моделей компьютерного зрения. Пример изображения обучающего датасета, полученного во время сбора по предложенной методике, представлен на рисунке 1. Предлагаются критерии оптимизации методики регулирования гиперпараметров и механизмы обеспечения устойчивости алгоритмов в условиях реального применения. Разрабатывается система количественных метрик для комплексной оценки качества моделей, включая точность классификации, полноту, F1-меру, а также устойчивость к «шуму» и искажениям в данных. Для достижения максимального значения выбранных классификационных метрик были применены методы аугментации данных для повышения устойчивости работы системы в различных условиях эксплуатации. Пример генерации различных условий освещенности приведен на рисунке 2.

Описывается процесс дистилляции моделей, направленный на снижение вычислительной сложности путём переноса знаний с более сложной



Рисунок 2 — Генерация различных условий освещенности

модели-учителя на компактную модель-ученика. Выполнено сравнение производительности и точности моделей до и после дистилляции, продемонстрировано преимущество решения в области ресурсопотребления и увеличения скорости работы без критической потери качества.

Третья глава описывает методику проведения прикладных экспериментальных исследований и реализацию прототипа системы. Было разработано несколько рабочих прототипов технической части системы, вариации прототипов системы представлены на рисунках 3 и 4. Детально описаны граничные условия использования, определены ключевые параметры моделирования, включающие температурные режимы, расстояния до объектов, степень освещённости и характеристики применяемого оборудования.

Представлены этапы построения гетерогенной архитектуры системы, объединяющей инфракрасные сенсоры, блоки обработки изображений, алгоритмы компьютерного зрения и программные компоненты на базе нейросетевых моделей. Подробно описаны принципы калибровки оборудования и методология проведения серии тестов, направленных на проверку функционирования каждого отдельного модуля и системы в целом. Подробно проработанная архитектура разработанной системы представлена на рисунке 5.

Разработаны экспериментальные процедуры, предусматривающие сбор репрезентативных данных в различных условиях эксплуатации, которые позволяют смоделировать полноценное поведение генеральной



Рисунок 3 — Прототип системы.
Версия 1



Рисунок 4 — Прототип системы.
Версия 2

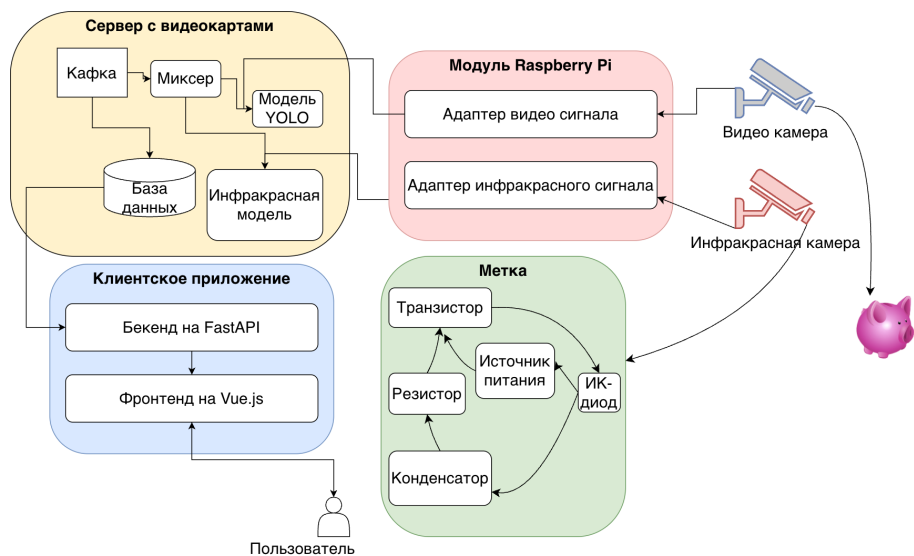


Рисунок 5 — Схема работы системы идентификации сельскохозяйственных животных

совокупности на основе небольшого набора данных. Обоснована применимость метода и выявлены ограничения корректного использования системы. Разработан сервис с адаптивным пользовательским интерфейсом системы идентификации сельскохозяйственных животных (рисунок 6). Произведен анализ ошибок и причин возможных отклонений в работе

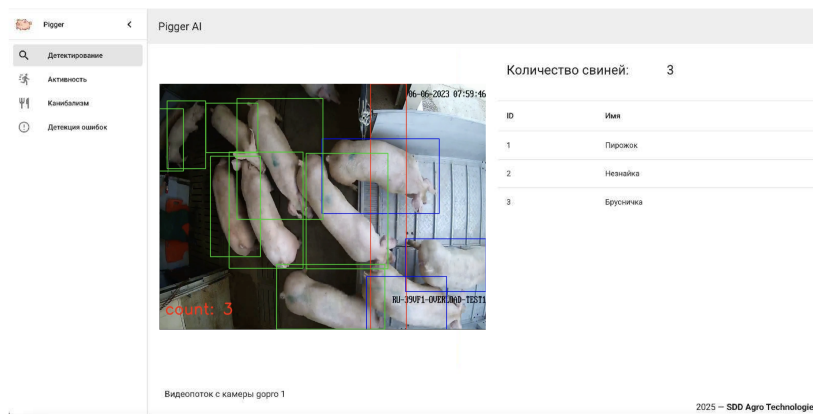


Рисунок 6 — Интерфейс клиентского приложения для производственных испытаний

системы, сформированы рекомендации по их минимизации. Предложена единая система критериев для количественной оценки результатов, обеспечивающая воспроизводимость и объективность проведённых исследований.

Четвёртая глава включает описание результатов экспериментальных исследований и апробации разработанной системы идентификации сельскохозяйственных животных на основе искусственного интеллекта и инфракрасной системы детекции в условиях реального сельскохозяйственного производства. Проведено всестороннее нагрузочное тестирование для выявления предельно допустимого уровня загруженности системы идентификации для ее стабильной работы. Результаты нагрузочного тестирования представлены на рисунке 7. Также были проведены производственные испытания по выявлению корреляции между количеством объектов и точностью идентификации. Результаты проанализированы и представлены на рисунке 8. График зависимости точности от числа объектов демонстрирует высокую эффективность инфракрасной системы идентификации сельскохозяйственных животных на основе искусственного интеллекта и инфракрасной системы детекции в обнаружении множества объектов при



Рисунок 7 — Нагрузочное тестирование системы

минимальных вычислительных ресурсов. При условии увеличения вычислительных мощностей разрешающая способность системы увеличивается. Далее в главе приведены количественные показатели точности, скорости

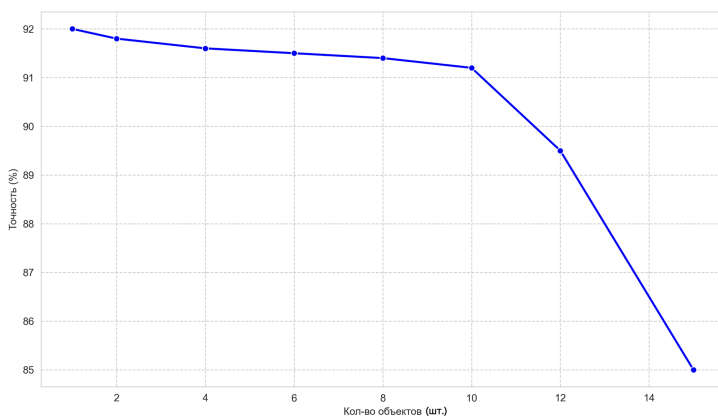


Рисунок 8 — Влияние количества объектов на точность при использовании минимальных вычислительных мощностей

обработки данных, надёжности идентификации животных и устойчивости к внешним воздействиям. Сравняются параметры работы системы при различных сценариях, включая высокую плотность размещения животных, переменную освещённость и наличие физического загрязнения сенсоров. Система продемонстрировала высокую устойчивость к изменяющимся факторам среды и обеспечила точность распознавания на уровне 92%, сохраняя возможность функционирования в реальном времени. Производственные испытания подтвердили устойчивость алгоритмов к

внешним помехам, изменению освещённости и наложению объектов, обеспечив среднюю точность 90,5% при систематическом отклонении не более 3 см. Производственные тесты показали стабильность функционирования системы в течение длительного времени: коэффициент доступности составил 99,9%, загрузка вычислительных ресурсов не превышала 70%, а использование оперативной памяти оставалось в пределах 63–74%. Анализ масштабируемости выявил, что при увеличении количества одновременно обрабатываемых объектов до десяти при условии применения минимальных вычислительных ресурсов, точность идентификации сохраняется выше 91%, а задержка обработки не превышает 48 мс, что подтверждает пригодность системы для промышленной эксплуатации в режиме реального времени.

Приведён анализ интеграции системы в производственный процесс, проведен мониторинг стабильности работы системы (рисунок 9), оценена степень удовлетворённости конечных пользователей, а также указаны возможности масштабирования и тиражирования разработки в более широком промышленном масштабе. Полученные результаты подтверждены свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ. Особое внимание уделялось вопросам совместимости с существующей цифровой инфраструктурой сельскохозяйственных предприятий и потенциалу расширения функциональности системы (например, для мониторинга поведенческих моделей животных).

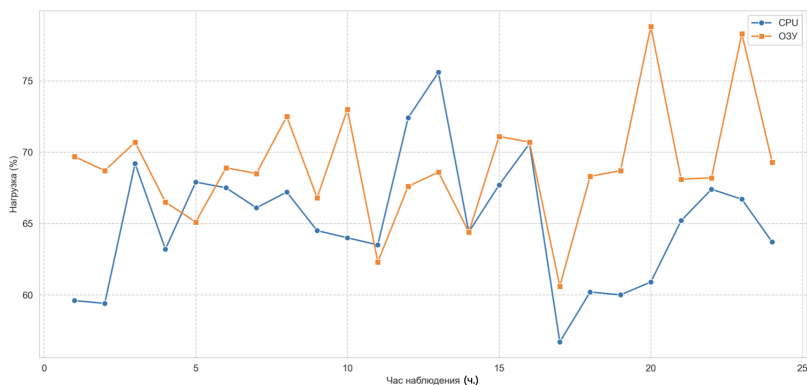


Рисунок 9 — Стабильность работы системы в течение 24 часов

Результаты испытаний показали, что разработанная система идентификации животных обладает высокой точностью, стабильностью и

устойчивостью к внешним воздействиям, соответствует требованиям промышленной эксплуатации и может быть рекомендована к внедрению. Проведённая апробация продемонстрировала высокий уровень готовности технологии к серийному использованию и возможность дальнейшего масштабирования без потери качества работы, что подтверждается актами внедрения системы в ООО «Башкирская мясная компания» и ООО «Агромилк»

Пятая глава посвящена технико-экономической оценке применения системы идентификации сельскохозяйственных животных на предприятиях АПК. Для оценки работоспособности и эффективности системы идентификации была проведена её апробация в производстве. Апробация включала анализ влияния различных параметров на точность распознавания и вычислительную нагрузку. В данной главе были представлены результаты исследований по четырём ключевым направлениям: разрешение видеопотока, угол наклона камеры, частота кадров и уровень освещённости. Дополнительно проведено исследование зависимости обра-

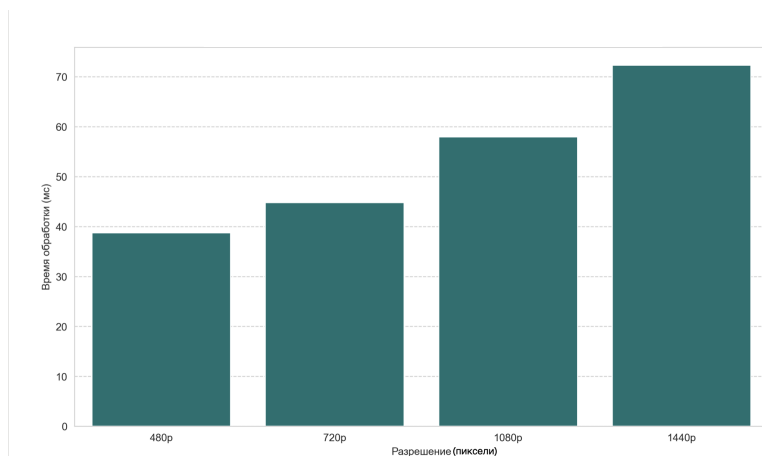


Рисунок 10 — Время обработки одного кадра в зависимости от разрешения

ботки одного кадра от разрешения видеопотока. По результатам анализа сделаны выводы о повышении качества детекции при увеличении разрешения камеры. Результаты анализа представлены на рисунке 10.

Угол наклона камеры также повлиял на метрики качества детекции. При увеличении угла наклона качество может значительно падать, что приводит к ограничению использования системы в сложных геометрических условиях. Результаты исследования зависимости угла наклона представлены на рисунке 11. Оценка точности системы в зависимости от количества кадров в секунду привело к выводам о том, что увеличение частоты кадров

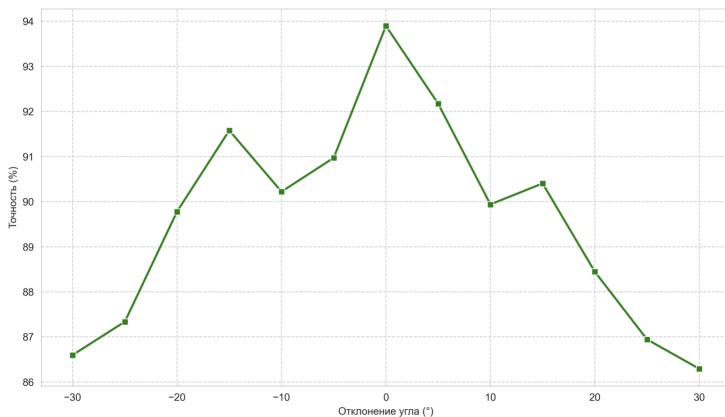


Рисунок 11 — Влияние угла камеры на точность идентификации

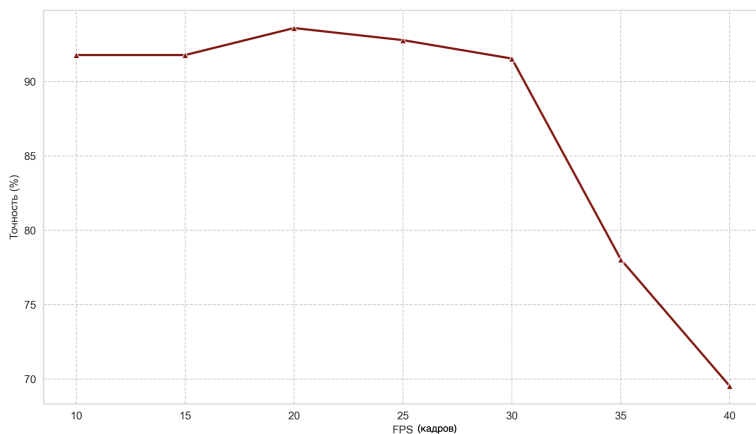


Рисунок 12 — Зависимость точности от частоты кадров

не вызвало увеличения метрик качества детекции. Это связано с перемножением ошибки системы детекции, которая увеличивается с ростом числа кадров. График зависимости качества детекции от частоты кадров представлен на рисунке 12. Качество детекции дополнительно зависит от освещенности, что подтверждается графиком зависимости, представленном на рисунке 13.

Подчёркивается соответствие технологии стратегии цифровой трансформации аграрного сектора и приоритетам его устойчивого развития. В таблице 2 представлены показатели экономической эффективности в зависимости от вида интеграции системы. Для каждой системы указаны

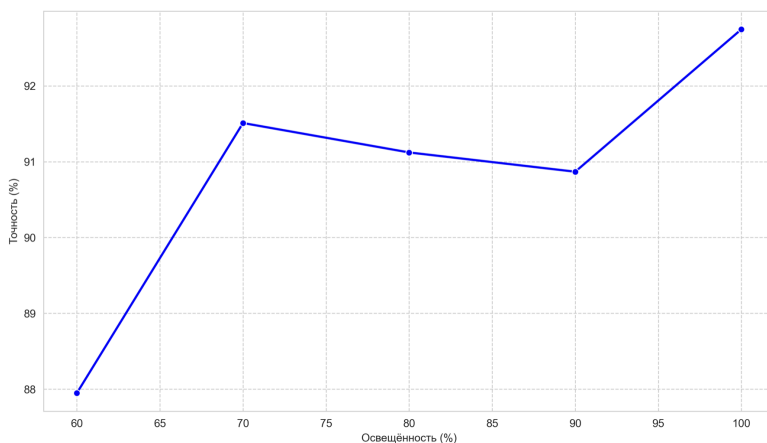


Рисунок 13 — Влияние освещённости на точность идентификации

показатели годовой экономии на 1000 голов свиней и коэффициент возврата инвестиций (ROI), рассчитанные на основе данных, полученных во время внедрения системы на производстве. Наибольший экономический эффект наблюдается при комплексной интеграции, где годовая экономия составляет от 800 до 1200 тысяч рублей на 1000 голов свиней, а ROI варьируется от 200 до 250%. Внедрение автокормления позволяет получить экономию в пределах 450-600 тысяч рублей с ROI от 140 до 180%. Интеграция ERP-системы приносит экономию от 200 до 350 тысяч рублей, а ROI составляет 90-120%. Наименьшие показатели экономии и ROI наблюдаются при интеграции с федеральными государственными информационными системами (ФГИС), где годовая экономия колеблется от 150 до 250 тысяч рублей, а ROI составляет 70-90%.

Таблица 2 — Пример расчета показателей экономической эффективности от интеграции системы в свиноводческих комплексах

Вид интеграции	Удельная годовая экономия (1000 голов)	ROI
Автокормление	450-600 т.р.	140-180%
ERP-система	200-350 т.р.	90-120%
ФГИС	150-250 т.р.	70-90%
Комплексная	800-1200 т.р.	200-250%

Перспективным направлением развития является создание единой цифровой платформы управления животноводством в каждой подотрасли, объединяющей все компоненты в единую экосистему.

В **заключении** приведены основные результаты работы: в диссертационной работе разработана интеллектуальная система идентификации

сельскохозяйственных животных, основанная на использовании технологии инфракрасной детекции и методов искусственного интеллекта. Система обладает высоким уровнем производственной устойчивости и большим потенциалом к масштабированию.

Методология сочетает в себе технологии инфракрасной идентификации и алгоритмы компьютерного зрения, адаптированные к различным внешним условиям. Система работает с точностью на уровне 92% при среднем времени обработки кадра менее 45 мс. Система успешно прошла производственные испытания и подтвердила свою экономическую эффективность. Снижение удельных годовых затрат для сельскохозяйственных предприятий составляет 800 тыс.—1,2 млн. рублей на 1000 голов при условии комплексной интеграции.

Таким образом, были получены следующие результаты работы:

1. Выполнен анализ 8 основных существующих методов идентификации сельскохозяйственных животных, выявлены их ограничения, доказана актуальность перехода к бесконтактным технологиям на основе инфракрасной детекции.
2. Подтверждена технологическая применимость инфракрасной системы идентификации для сельскохозяйственных животных, определены физико-технические параметры системы, включая длину волны (700нм—1500нм), мощность излучения (50–300 mW) и характеристики инфракрасных приемников (0,35–0,6 A/W) с расчетной погрешностью $\pm 0,5$ метра и дополнительными погрешностями позиционирования ± 2 см, систематической погрешностью скорости $\pm 0,1$ м/с. Для качественной работы системы определена граница точности, которая составила 70%. Благодаря выбранным современным методам аугментации изображений, обучающий датасет был увеличен с 5000 изображений до 15000, что позволило увеличить точность при обучении более чем на 20%.
3. Разработана и обоснована методология сбора и предварительной обработки датасета, включающего 5000 исходных изображений, а также дополнительных аугментированных наборов данных объемом 15 000 изображений, предназначенных для обучения моделей искусственного интеллекта.
4. Проведён анализ и адаптация методов искусственного интеллекта к задаче идентификации сельскохозяйственных животных. Реализован эффективный алгоритм на основе модели YOLO11, оптимизированной посредством дистилляции, позволяющей работать в реальном времени. Достигнутая точность составляет 92% со скоростью обработки 45 мс.
5. Разработан программно-аппаратный комплекс, включающий инфракрасные датчики, видеомодули, адаптивное клиентское приложение, сервис обработки потоковых данных и блок управления,

способный функционировать автономно и интегрироваться в цифровые платформы сельскохозяйственных предприятий «Пульс.ЦСС», «1С:Предприятие 8. ERP Агропромышленный комплекс».

6. Проведено компьютерное моделирование различных сценариев эксплуатации системы, выявлены предельные значения точности при изменении условий внешней среды и плотности потока животных. При количестве объектов более 15 точность определения составляет 85,0% со средним временем задержки детекции 62 мс. при условии использования минимально необходимых вычислительных мощностей, при увеличении мощностей точность растёт. При нормальном освещении медианное значение точности составляет около 89,5%, при этом наблюдается относительно широкий разброс значений. В условиях перепадов освещённости медиана повышается до 90,5%, что можно объяснить адаптацией системы к изменяющимся условиям.
7. Выполнены лабораторные и производственные испытания в 2 сельскохозяйственных предприятиях (ООО «Башкирская мясная компания» и ООО «Агромилк»), подтвердившие устойчивость системы к внешним помехам, статистическая обработка данных показала достоверность результатов на уровне статистической значимости $\alpha = 0,05$.
8. Выполнена экономическая оценка внедрения системы на предприятии: зафиксировано снижение затрат на идентификацию и обслуживание, рост эффективности производственного мониторинга, снижение потерь из-за ошибок идентификации. Полученное во время апробации в идеальных производственных условиях значение рентабельности в размере 175,9% свидетельствует о высокой эффективности и значительном уровне доходности от внедрения системы, что подтверждает её экономическую целесообразность и инвестиционную привлекательность.

В качестве перспектив дальнейших исследований предлагается:

- реализация масштабируемой версии системы с поддержкой облачной обработки и интеграции в ERP-системы агропредприятий;
- расширение функционала системы для биометрического мониторинга состояния сельскохозяйственных животных (анализ термограммы, выявление воспалений и нарушений температурного фона);
- адаптация системы под различные виды сельскохозяйственных животных и условий содержания (открытые пастбища, интенсивные фермы);
- разработка модуля автоматического выявления отклонений и передачи оповещений в режиме реального времени;

- внедрение REST API-интерфейса для подключения внешних аналитических систем для управления системой идентификации и получения отчётности.

Все представленные в работе разработки выполнены с использованием открытого программного обеспечения под свободной лицензией, совместимой с GNU GPL. Исследования и эксперименты проводились в среде Ubuntu 22.04 с использованием Python 3.14 и библиотек: OpenCV, PyTorch, NumPy, Matplotlib, SciPy, pandas и другие.

Предложенное решение в полной мере соответствует требованиям цифровизации АПК и открывает возможности для построения автономных интеллектуальных систем учёта, мониторинга и управления животноводческими комплексами.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ:

1. Абдрахимов, Д. А. Технология идентификации животных на основе искусственного интеллекта и инфракрасной системы детекции / Д. А. Абдрахимов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2024. — Т. 204. — С. 1—11.
2. Абдрахимов, Д. А. Технология инфракрасной идентификации в задаче детекции сельскохозяйственных животных / Д. А. Абдрахимов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. — 2025. — Т. 207. — С. 279—292.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Интеллектуальный сервис инфракрасной системы идентификации сельскохозяйственных животных / М. Н. Степанцевич, Д. А. Абдрахимов. — № 2024690472; заявл. 18.11.2024; опубли. 16.12.2024, 2024690472 (RU).
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Сервис почвенных изысканий / Б. А. Борисов [и др.]. — № 2024686455; заявл. 22.10.2024; опубли. 08.11.2024, 2024686455 (RU).
5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Цифровой сервис детекции болезней яблони / И. С. Касатов, М. Н. Степанцевич, Д. А. Абдрахимов. — № 2024689009; заявл. 18.11.2024; опубли. 03.12.2024, 2024689009 (RU).

В сборниках трудов конференций:

6. Абдрахимов, Д. А. Разработка технологии идентификации свиней на основе искусственного интеллекта и инфракрасной системы детекции / Д. А. Абдрахимов // Управление рисками в АПК. — 2024. — С. 353—356.
7. Абдрахимов, Д. А. Актуальность разработки сервиса инфракрасной системы идентификации свиней на основе искусственного интеллекта / Д. А. Абдрахимов, М. Н. Степанцевич // Управление земельно-имущественным комплексом в условиях цифровизации агропромышленного производства : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 80-летию высшего землеустроительного образования в Пермском крае. — Пермь: ИПЦ Прокрость, 2024. — С. 13—18.