

На правах рукописи

Чиликин Андрей Дмитриевич

**РАЗРАБОТКА МОДУЛЯ ОПТИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ
ДЛЯ СОРТИРОВКИ ПЛОДОВ ЯБЛОНИ НА ОСНОВЕ
ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ**

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

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в отделе «Технологии и машины для садоводства, виноградарства и питомниководства» Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ).

Научный руководитель: Хорт Дмитрий Олегович, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией машинных технологий для возделывания и уборки плодово-ягодных культур ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Официальные оппоненты: Дивин Александр Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры «Мехатроника и технологические измерения» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».

Юхин Иван Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автотракторная техника и теплоэнергетика» ФГБОУ ВО «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Мичуринский государственный аграрный университет»

Защита состоится 3 декабря 2025 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета 24.1.247.03, созданного на базе ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ), по адресу: 109428, город Москва, 1-й Институтский пр-д, д.5.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 109428, город Москва, 1-й Институтский пр-д, д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и на сайте Института www.vim.ru.

Автореферат разослан «__» октября 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РАН

Сибирев Алексей Викторович

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Агропромышленный комплекс играет системообразующую роль в обеспечении продовольственной безопасности страны, а сортировка плодов, в частности яблок, является ключевым этапом подготовки продукции к хранению и реализации. Эффективность сортировки напрямую влияет на сохранность урожая: наличие своевременно незамеченных повреждений, заболеваний или дефектов способно привести к распространению гниения в партии, что, в свою очередь, существенно увеличивает постуборочные потери.

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики в последние годы в России наблюдается устойчивый рост площади яблоневых садов, валового сбора и объёма реализации яблок. Этот тренд подчёркивает возрастающую значимость технологий автоматизированной сортировки, способных обеспечить высокую точность и производительность при отборе плодов.

В настоящее время на предприятиях применяется ручной контроль с конвейерной транспортировкой и автоматические системы сортировки на основе технического зрения и спектрофотометрии в ближнем ИК-диапазоне. Точность этих систем не превышает 90%, что недостаточно для выявления всех дефектов. Плоды со скрытыми повреждениями попадают в хранилища, вызывая заражение другой продукции. Потери яблок от недостаточной сортировки достигают 15-30% от объёма, особенно при длительном хранении.

Актуальной задачей является совершенствование алгоритмического и аппаратного обеспечения систем сортировки. Разработка методов классификации на основе гиперспектрального анализа, машинного обучения и нейросетевых моделей может повысить эффективность сортировки, минимизировать потери и обеспечить соответствие ГОСТ 34314-2017.

Степень разработанности темы. Спектральный анализ широко используется в различных отраслях промышленности и науки в том числе и в сельском хозяйстве, служит универсальным инструментом, который позволяет точно и оперативно исследовать биологические объекты. Эта информация необходима для правильного ведения технологических процессов, контроля качества сельскохозяйственной продукции.

Анализ технического уровня показал, что в практике спектрального анализа используются различные приборы и различные источники возбуждения спектров. В последнее время наибольшее применение находят спектрометры, построенные по схеме дифракционных спектрографов с фотоэлектронной регистрацией спектра. Выбор способа спектрального анализа во многом зависит от цели анализа и типов спектров. Эффективность подобных систем во многом определяется надёжностью алгоритмов анализа изображений.

Наибольшая активность в разработке интеллектуальных систем идентификации для сельского хозяйства наблюдается в Китае. Ренфу Лу¹ занимается неразрушающим контролем качества фруктов с использованием гиперспектральной визуализации и нейросетей. Цзянбо Лиа² разрабатывает методы спектрального компьютерного зрения и обработки изображений. Среди отечественных учёных, внёсших весомый вклад в эту сферу, выделяются Будаговский А. В.³, Соловченко А.Е.⁴, Дивин А. Г.⁵, Жиркова А.А.⁶, Шурьгин Б. М.⁷, Юхин И.А.⁸, Дорохов А.С.⁹, Смирнов И.Г.¹⁰, Ценч Ю. С.¹¹, Хорт Д.О.¹² и др.

¹ Lu R. Innovative Hyperspectral Imaging-Based Techniques for Quality Evaluation of Fruits and Vegetables / R. Lu, Y. Lu, Y. Huang, // Applied Science. — 2017. — № 7. P. 189. <https://doi.org/10.3390/app7020189>

² Lia J. Early detection of decay on apples using hyperspectral reflectance imaging combining both principal component analysis and improved watershed segmentation method / J. Lia, W. Luob, Z. Wang, S. Fana // Postharvest Biology and Technology. — 2019. — № 149. P. 235-246. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.12.007>

³ Budagovsky A. V. Application of laser irradiation for the estimation of functional state and the resistance to biotic and abiotic stresses in horticultural plants / A. V. Budagovsky, O. N. Budagovskaya, S. A. Goncharov, Yu. G. Belyachenko, F. Lenz, B. Oertel // EUCARPIA Fruit Breeding Section Newsletter. — 2001. — № 5. P. 31-32. DOI:10.1088/1555-6611/abebda

⁴ Solovchenko A. E. Reflectance spectral features and non-destructive estimation of chlorophyll, carotenoid and anthocyanin content in apple fruit / A. E. Solovchenko, M. N. Merzlyak, A. A. Gitelson // Postharvest Biology and Technology. — 2003. — № 27 (2). P. 197-211. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00066-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00066-2)

⁵ Балабанов П. В. Система оптико-электронной сортировки яблок на конвейере / П. В. Балабанов, А. Г. Дивин, А. С. Егоров, А. А. Жиркова // Контроль. Диагностика. — 2022. — № Т. 25. № 1 (283). С. 38-44. DOI 10.14489/td.2022.01.pp.038-044. EDN AQVEOT.

⁶ Жиркова А. А. Выбор источников освещения при оптико-электронном контроле качества фруктов / А. А. Жиркова, П. В. Балабанов, А. Г. Дивин // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2021. — № 27 (4). — С. 536-542.

⁷ Shurygin B. Non-Invasive Probing of Winter Dormancy via Time-Frequency Analysis of Induced Chlorophyll Fluorescence in Deciduous Plants as Exemplified by Apple (*Malus × domestica* Borkh.) / B. Shurygin, I. Konyukhov, S. Khruschev, A. Solovchenko // Plants. — 2022. — Vol. 11, No. 21. — P. 2811. DOI 10.3390/plants11212811. EDN PTEDVA.

⁸ Успенский И. А. Воздействие колебаний плодоовощной продукции на ее повреждения / И. А. Успенский, Л. П. Бело, А. С. Сивиркина, И. А. Юхин, О. В. Филюшин // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П. А. Костычева. — 2024. — Т. 16, № 1. — С. 155-162. — DOI 10.36508/RSATU.2024.98.54.021. — EDN IXADSM.

⁹ Дорохов А. С. Теоретическое обоснование транспортера для выгрузки корнеплодов овощных культур и клубней картофеля из хранилища / А. С. Дорохов, А. В. Сибирев, А. Г. Аксенов // Вестник Казанского государственного аграрного университета. — 2024. — Т. 19, № 1(73). С. 48-53. DOI 10.12737/2073-0462-2024-48-53. EDN FFXTIA.

¹⁰ Смирнов И. Г. Разработка программно-аппаратного комплекса с мобильным приложением на основе нейронной сети для мониторинга плодов яблони в кроне дерева / И. Г. Смирнов, А. И. Кутырёв, Д. О. Хорт, Е. А. Тумаева, Ю. В. Бурменко // Садоводство и виноградарство. — 2023. — № 1. С. 43-51. DOI 10.31676/0235-2591-2023-1-43-51. EDN ELOFCO.

¹¹ Ценч Ю. С. Развитие систем управления полетом и средств аэрофотосъемки беспилотных воздушных судов сельскохозяйственного назначения / Ю. С. Ценч, Р. К. Курбанов, Н. И. Захарова // Сельскохозяйственные машины и технологии. — 2024. — Т. 18, № 2. С. 11-19. DOI 10.22314/2073-7599-2024-18-2-11-19. EDN JPLEGX.

¹² Хорт Д. О. Интеллектуальные машинные технологии в садоводстве / Д. О. Хорт, И. Г. Смирнов // Таврический вестник аграрной науки. — 2017. — № 1 (9). С. 119-126. EDN ZFUWRZ.

Нормативные документы (ГОСТ 34314-2017, ГОСТ Р 50528-93, ГОСТ 27819-88) содержат конкретные требования к качеству яблок, включая параметры внешнего вида, сорта и назначения (для хранения или розничной реализации). Эти стандарты могут использоваться как основа при обучении и калибровке систем автоматического контроля качества.

Объект исследований: процесс оптического сканирования плодов яблони при их поточном движении на транспортере сортировочного стола.

Предмет исследований: параметры гиперспектральной съемки плодов яблони при их поточном движении и повреждения плодов перед закладкой на хранение.

Цель исследований: повышение эффективности поточной сортировки плодов яблони на основе гиперспектральной оптической идентификации здоровых и поврежденных поверхностей.

Задачи исследований:

1. Выполнить анализ современного состояния технического уровня систем оптического сканирования и технологических требований к качеству плодов яблони.

2. Теоретически обосновать параметры модуля оптической идентификации плодов яблони и кинематические параметры их движения на роликовом транспортере.

3. Разработать прототип модуля оптической идентификации плодов яблони.

4. Разработать методику сканирования плодов яблони с различных ракурсов и определить спектральные признаки повреждения их поверхности при движении на роликовом транспортере.

5. Выполнить экспериментальные исследования параметров и режимов работы прототипа модуля оптической идентификации плодов яблони на основе гиперспектральной съемки.

6. Выполнить технико-экономическую оценку модуля для оптической идентификации плодов яблони.

Научная новизна:

- корреляционные зависимости коэффициента отражения световых волн в гиперспектральном диапазоне от типа повреждений плодов яблони;

- алгоритм идентификации повреждений плодов яблони на основе гиперспектральных изображений и методов машинного обучения.

Практическая значимость работы:

Разработан модуль оптической идентификации, сканирующий плоды яблони при движении их по конвейеру.

Разработана база данных, в которой содержится классификация растительных тканей яблок по видам дефектов в реальном времени при их движении по транспортному конвейеру.

Разработана методика сканирования плодов яблони с различных ракурсов.

Теоретическая значимость исследования. В работе установлены закономерности изменения спектральных характеристик плодов в диапазонах 550 – 800 нм в зависимости от степени повреждений и содержания фотосинтетических пигментов на поверхности плода. Установлено, что использование вегетационных индексов (CI700 и mARI) позволяет количественно оценивать степень поражения тканей плодов яблони.

Теоретическая и методологическая основа исследования: теоретические исследования выполнили с использованием законов и методов теоретической механики, математики, использованы методы компьютерного проектирования, моделирования и программирования. Обработка экспериментальных данных и компьютерное моделирование, проектирование осуществлялось при помощи программного обеспечения САПР КОМПАС-3D 2017, Excel, PlanExpB-D13_v.1.0, SolidWorks Simulation. Полевые исследования проводились в соответствии с современными действующими ГОСТами с использованием методики планирования экспериментов.

Реализация результатов исследований. Результаты диссертационной работы использованы в ООО «АГРОКРАФТ РУС» для определения болезней и механических повреждений плодов яблони, поступающих на сортировочные линии после уборочных операций. Получены акты о внедрении результатов.

Апробация. Основные положения и результаты исследования докладывались на международных научно-технических конференциях:

1. XVII Всероссийская выставка «День садовода-2023», конференция «Садоводы – за здоровьесбережение нации!» Мичуринск, Тамбовская область – 14-15 сентября 2023 г.;

2. XIII Международный форум «Дни сада в Бирюлево. Междисциплинарные исследования: поиск новых и эффективных путей, стратегий и механизмов развития отечественного садоводства», ФГБНУ ФНЦ Садоводства, Москва - 17-19 августа 2023 г.;

3. Международная научно-практическая конференция «Энергообеспечение АПК», ФГБНУ ФНАЦ ВИМ, Москва - 20-21 декабря 2023 г.;

4. XVIII Всероссийская выставка «День садовода-2024», конференция ««Новые знания и инновационные технологии - в развитие современного садоводства» Мичуринск, Тамбовская область – 12-13 сентября 2024 г.;

5. XIV Международный форум «Дни сада в Бирюлево. Научно-технологическое развитие садоводства и питомниководства: повышение эффективности производства плодово-ягодной продукции и снижение уровня импортозависимости», ФГБНУ ФНЦ Садоводства, Москва - 15-16 августа 2024 г.;

6. XV Международный Форум «Дни сада в Бирюлево. Научно-технологическое развитие садоводства и питомниководства: актуальные проблемы, достижения, перспективы», приуроченный к 95-летию со дня основания учреждения. Научно-информационный центр ФГБНУ ФНЦ Садоводства (Москва) - 20-21 августа 2025 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ из них 3 научные статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России; 4 статьи в изданиях, индексируемых в международных базах (Web of Science, Scopus); получено 3 авторских свидетельства, из них 1 патент на изобретение, 2 свидетельства о государственной регистрации базы данных.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 136 страницах, состоит из введения; основной части из четырех глав, содержащей 38 рисунков, 14 таблиц; заключения; списка сокращений и условных обозначений; списка литературы, включающий 107 наименований, в том числе 48 – на иностранном языке и 5 приложений.

Диссертация выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для реализации крупных научных проектов по приоритетным направлениям научно-технического развития на тему: «Разработка природоподобных технологий управления свойствами и качественными показателями растений с использованием методов биофотоники и цифровых систем» (Соглашение о предоставлении гранта на проведение крупных научных проектов № 075-15-2024-540 от 24.04.2024 г.).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы объект, предмет исследования, цель и задачи, представлена научная новизна.

В первой главе «Состояние вопроса, обоснование актуальности исследования» проведен анализ требований нормативной документации РФ к показателям качества яблок, а также анализ научных статей, патентов, монографий и публикаций, касающихся разработки методов неразрушающего контроля качества яблок при сортировке на конвейере.

Анализ технического уровня показал, что в практике спектральной экспертизы используются различные приборы и различные источники возбуждения спектров. В последнее время наибольшее применение находят спектрометры, построенные по схеме дифракционных спектрографов с фотоэлектронной регистрацией спектра. Взаимодействие машинного обучения с гиперспектральным анализом позволяет эффективно извлекать информативные признаки из спектральных данных и использовать их для точной классификации состояния плодов. Алгоритмы обучения обрабатывают отражательные характеристики в различных длинах волн, выявляя закономерности, связанные с повреждениями, заболеваниями или физиологическими изменениями плодов.

Контролируемые алгоритмы, включая метод опорных векторов (SVM) и классификатор случайного леса (Random Forest), позволяют осуществлять обучение модели на размеченных данных и достигать высокой точности в распознавании поврежденных плодов. Неконтролируемые методы, такие как

кластеризация (например, K-средних), применяются для автоматического выявления структур в данных без предварительной разметки.

Для повышения эффективности поточной сортировки плодов яблони перспективным направлением являются автоматизированные системы контроля качества на основе гиперспектральной визуализации. Комбинация спектральных методов с алгоритмами машинного обучения, включая нейросетевые подходы, способна обеспечить точность автоматической идентификации болезней и повреждений плодов яблони до 99%.

Во второй главе «Разработка оптического модуля идентификации плодов на основе гиперспектральной визуализации» представлен прототип модуля оптической идентификации плодов яблони на основе гиперспектральной съемки (рисунок 1), с помощью которого были получены гиперспектральные изображения.



Рисунок 1 – Модуль оптической идентификации, выполненный в SolidWorks Simulation

Выполнен анализ напряженного деформированного состояния конструкции (рисунок 2). На основании полученных результатов и требований к надежности и долговечности были выбраны следующие ключевые компоненты:

- рельсовая направляющая: HSAC GHR15;
- шарико-винтовая передача (ШВП): SCR1605-TBI;
- шаговый двигатель: биполярный PL57H110-D8.

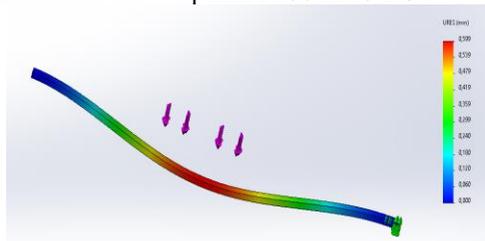


Рисунок 2 – Анализ напряженно - деформированного состояния рельсовой направляющей HSAC GHR15, выполненный в SolidWorks Simulation

В SolidWorks Simulation проведено моделирование механических нагрузок и перемещений конструкции модуля оптической идентификации с учетом реальных условий эксплуатации.



1 - рама установки; 2 - гиперспектральная камера; 3 - стол с резиновыми роликами; 4 - подвеска камеры; 5, 6 - шаговые двигатели; 7 - трансмиссия; 8 - источник света

Рисунок 3 – Прототип модуля оптической идентификации для получения гиперспектральных изображений плодов яблоки

Модуль оптической идентификации, показанный на рисунке 3, реализует процесс транспортировки плодов по конвейерной линии и обеспечивает их вращение на 360° вокруг собственной оси за счёт действия роликов ориентирующего модуля (рисунок 4).

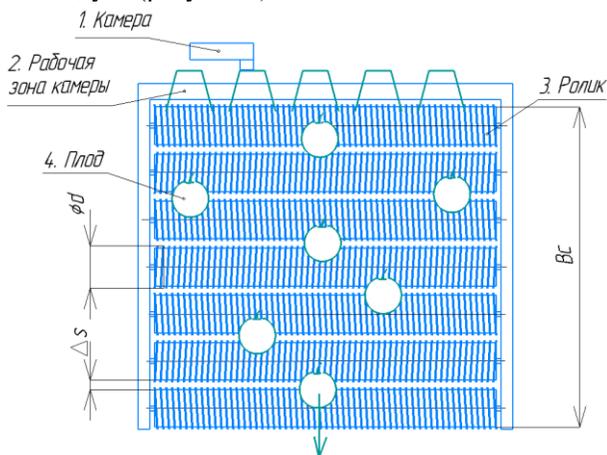


Рисунок 4 – Конструктивная схема роликового транспортера оптической системы идентификации

Расположение плодов на 1 погонном метре, определяется по формуле:

$$n_l^1 = \frac{B_c k_c}{d_p h_l}, \quad (1)$$

где B_c – рабочая ширина калибратора, м;

h_l – размер плода по высоте, м;

k_c – коэффициент, учитывающий площадь, необходимую 1 плоду яблони для свободного и устойчивого калибрования;

d_p – диаметр ролика, м.

При работе модуля плоды яблок движутся в поперечном направлении с осевым вращением, что обеспечивается вращением роликов с одинаковой угловой скоростью в результате взаимодействия с плодами (рисунок 5). Основными параметрами роликов является диаметр D_p , шаг винтовой линии t , высота витка и зазор ΔS между смежными роликами.

Максимальное количество плодов на 1 погонный метр 12 яблок. Плоды подаются на рабочую поверхность роликового транспортера, не более 12 яблок на 1 пог.м. Камера движется над всей рабочей поверхностью стола, сканируя каждый участок, как изображено на рисунке 4 и позволяет запечатлеть и собрать информацию по всем плодам. Для идентификации каждого плода и присвоения уникального идентификатора может применяться RGB-модуль гиперспектральной камеры в сочетании с нейросетевой моделью на архитектуре YOLO, способной обеспечивать нумерацию яблок в режиме реального времени.

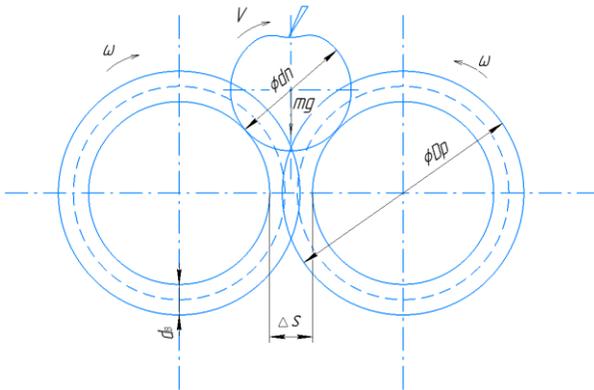


Рисунок 5 – Схема взаимодействия роликов ориентирующего модуля оптической системы идентификации с плодом яблока

С увеличением диаметра и зазора между роликами возрастает их захватывающая способность. Данные параметры выбираются из условия отсутствия защемления биологических объектов:

$$\frac{d_n \cos \varphi_n - \Delta S}{1 - \cos \varphi_n} > D_p > \frac{d_{np} \cos \varphi_{np} - \Delta S}{1 - \cos \varphi_{np}}, \quad (2)$$

где d_n , d_{np} – диаметр плода и толщина примесей, м;

$\varphi_{п}, \varphi_{пр}$ – угол трения по поверхности ролика плодов и примесей, рад.

Верхняя и нижняя границы составили 0,11 м и 0,125 м соответственно.

Для распознавания всей поверхности биологического объекта плод выполняет ориентированное движение по всей длине модуля, и располагается на центральной оси перпендикулярно к направлению движения и соответственно наибольшим диаметром по направлению движения, в котором положение центра тяжести плода минимальное для рассматриваемого модуля.

В рамках исследования были проведены расчеты, направленные на определение рабочих скоростей в модуле гиперспектральной съемки яблок на роликовом транспортере. Эти расчеты включали определение скорости сканирования камеры, скорости движения каретки и скорости перемещения яблок на вращающихся валиках.

Линейная скорость движения яблока на резиновых роликах сортировочного стола выражается через угловую скорость роликов и самого яблока:

$$V_{ябл} = R_p \cdot \omega_p, \quad (3)$$

где ω_p - угловая скорость ролика, рад/с;

R_p – радиус ролика, м.

Угловая скорость ролика выражается по следующей формуле:

$$\omega_p = 2 \cdot \pi \cdot f_p, \quad (4)$$

где f_p - частота вращения валиков, с⁻¹.

Каретка с гиперспектральной камерой движется по винтовой передаче SCR1605-TBI с помощью шагового двигателя PL57H76-D6. Скорость ее движения определяется параметрами винтовой передачи и частотой подачи импульсов на шаговый двигатель:

$$V_{кар} = \frac{F_s}{N_{шаг}} \cdot t_v, \quad (5)$$

где $N_{шаг}$ – количество шагов на один полный оборот винта, шт (200 шагов × 16 микрошагов), шт;

F_s - частота импульсов, Гц;

t_v - шаг винтовой передачи, м.

Частота импульсов прописывается оператором при программировании микроконтроллера ATmega168.

Гиперспектральная камера OCI-F BaySpec использует линейное сканирование, при котором фиксируется одна строка изображения за время экспозиции. Скорость сканирования выражается через количество кадров в секунду и длину кадра:

$$V_{скан} = FPS \cdot b_{кадр}, \quad (6)$$

где $b_{кадр}$ – длина кадра, м;

FPS – частота регистрации одного кадра, с⁻¹.

Пропускная способность канала передачи данных способна передавать данные с частотой кадров, что обеспечивается пропускной способностью кабеля USB 3.0.

По итогам расчетов, можно считать, что $V_{\text{скан}} \approx V_{\text{ябл}} \approx V_{\text{кар}}$. Правильное соотношение скоростей обеспечивает высокое качество съемки и достоверность получаемых данных.

На основе анализа технических требований к системе гиперспектральной съемки был определен набор основных характеристик. Важным требованием является функционирование в спектральном диапазоне 400-1000 нанометров, охватывающем видимую и ближнюю инфракрасную зоны спектра. Этот диапазон необходим для комплексного анализа окраски плодов в видимой области и обнаружения подкожных дефектов в ближней инфракрасной области, где проявляются полосы поглощения воды и других биохимических компонентов тканей. Спектральное разрешение системы должно составлять не менее 10 нм для различения узких пиков поглощения ключевых компонентов, таких как хлорофилл (650-670 нм) и антоциан (550-600 нм). Для работы в условиях непрерывного перемещения плодов по транспортеру линейный метод сканирования позволяет получать полные гиперкубы для каждого плода без пропуска участков поверхности. Пространственное разрешение системы должно обеспечивать величину наземного разрешения менее 0,8 миллиметра на пиксель для обнаружения дефектов размером от 2 миллиметров. Это позволяет дифференцировать спектральные признаки различных дефектов, таких как механические повреждения и грибковые поражения, что повышает точность сортировки.

Гиперспектральная камера OSI-F (400-1000 нанометров, 120 спектральных каналов) соответствует предъявляемым требованиям. Камера функционирует в диапазоне 400-1000 нанометров и обеспечивает спектральное разрешение 5-7 нанометров, что превышает минимально необходимое значение и позволяет различать тонкие спектральные признаки различных типов дефектов. При высоте монтажа от 50 см и штатном объективе 16 мм камера обеспечивает расчётное пространственное разрешение 0,23 мм/пиксель. Дефекты размером 2 мм на плоде будет отражен на изображении в количестве от 8 пикселей. Режим линейного сканирования является оптимальным для работы с непрерывно движущимися объектами на роликовом столе.

Для обеспечения стабильных условий гиперспектральной съемки в системе применяется искусственное освещение всей рабочей поверхности роликового транспортера на основе четырех галогенных ламп типа JC DR-35/GU5.3. Расчет общего светового потока системы проводится по следующей формуле:

$$\Phi = P \cdot \eta, \quad (7)$$

где P — мощность одной лампы, Вт;

η — световая отдача галогенных ламп, лм/Вт.

Формула перевода в единицы освещенности для всей рабочей поверхности роликового транспортера составляет:

$$E = \frac{\Phi}{S_{\text{раб}}}, \quad (8)$$

где Φ — общий световой поток системы, лм;

$S_{\text{раб}}$ — площадь рабочей поверхности, м².

Использование прототипа модуля оптической идентификации было произведено пять тестировочных сканирований для получения гиперспектральных снимков в условиях варьирования освещённости от 200 до 3010 Лк, начиная с естественного освещения без галогенных ламп и последовательно увеличивая количество источников света от одного до четырёх галогенных ламп.

Для коротких выдержек 1-5 мс, требуемых при гиперспектральной съёмке движущихся объектов, уровень освещенности составляет 1000-2000 лк. Выбранная система освещения обладает достаточным световым потоком для обеспечения качественной съёмки с учетом потенциальных потерь в оптической системе.

Для программирования и работы с базой данных выбрана система управления SQLite, поскольку для хранения базы данных не требуется выделенный сервер. База данных представляет собой локальный файл, размещенный в папке приложения. Для работы с базой данных использован инструмент DB Browser for SQLite. С помощью DB Browser создана база данных и добавлены поля для хранения текстовой информации о культуре, классе, названии болезни, описании повреждения, описании болезни, значениях видимого, ИК и УФ-спектров изображений, а также строка для хранения пути к изображениям на жестком диске.

В третьей главе «Методика и результаты экспериментальных исследований» приведена методика проведения исследований по сканированию плодов яблони с помощью разработанного модуля оптической идентификации.

Съёмка плодов осуществлялась с использованием программного обеспечения «SpecGrabber», в котором задавались необходимые параметры получения гиперспектральных изображений.

Для последующей обработки полученных необработанных данных, применялось программное обеспечение BaySpec Cube Creator, разработанное для операционных систем Microsoft Windows (версии Windows 7 и Windows 10). Данное программное обеспечение (ПО) обеспечивает формирование гиперспектральных кубов из исходных изображений, а также предоставляет инструменты для визуализации и верификации белого эталона, тёмного фона и необработанных данных. Кроме того, программа позволяет осуществлять просмотр гиперспектральных кубов и отдельных полосовых изображений. Обработка гиперспектральной информации, включая разметку областей интереса (ROI), просмотр и экспорт спектральных данных, а также поканальный анализ

спектров, проводилась в специализированном программном обеспечении «Gelion», разработанном для анализа гиперспектральных данных (рисунок 6).

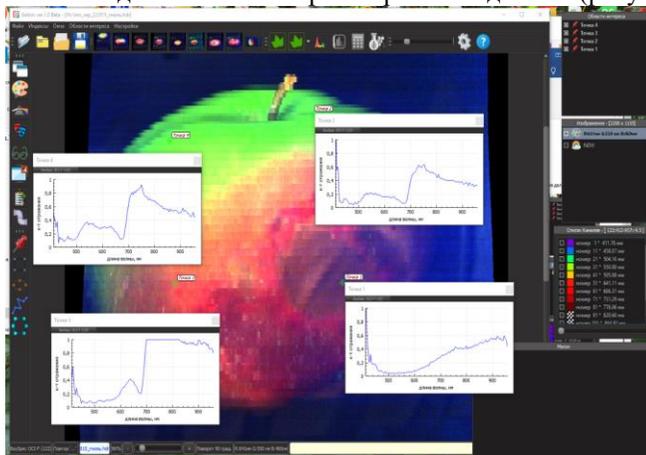


Рисунок 6 – Гиперкуб биологического объекта в программе «Gelion»

Анализ спектров, экспортированных в цифровой форме, осуществляли в электронных таблицах. Достоверность различия средних величин оценивали по t -критерию Стьюдента, а также использовали однофакторный дисперсионный анализ средствами Analysis Toolpack в Microsoft Excel 2019.

Для выявления наиболее оптимальных параметров получения гиперспектральных изображений, пригодных для обработки и анализа, эксперимент был проведён с трёхкратной повторностью. Статистическая обработка полученных результатов эксперимента проведена с помощью математического моделирования методом планирования экспериментов. Основными параметрами, которые влияют на качество гиперспектрального снимка являются: скорость движения каретки с камерой; световой поток, исходящий от галогенных ламп; высота подъема камеры над сортировочным столом.

В расчете факторного плана значения уровней входных факторов приняты в кодированном виде, при этом основной уровень (центр плана) каждого фактора обозначен как «0», а нижний и верхний уровни – «-1» и «+1» соответственно. В качестве выходного параметра принимается качество изображения, которое выражается в количестве пикселей. Обработка данных планированного эксперимента проведена в среде MathCad 15 и в программе PlanExp B-D13 v.1.0. Для нахождения сочетания факторов, обеспечивающих оптимальное значение выходного параметра, построены поверхности откликов.

Основные показатели, полученные в результате статистической обработки данных представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты статистической обработки полученных данных

Показатель	Значение
Дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах	0,011
Табличное значение критерия Стьюдента	2,09
Дисперсия адекватности математической модели	0,026
Число степеней свободы при значимых коэффициентах	4
Табличное значение критерия Фишера	2,87
Расчетное значение критерия Фишера	2,36

Преобразованное уравнение математической модели с учетом постоянного фактора:

$$y = 0,998 + 0 + 0,173 \cdot x_2 + 0,096 \cdot x_3 + 0 + (-0,086) \cdot x_2^2 + 0,083 \cdot x_3^2 + 0 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,042 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (9)$$

Наличие экстремума функции отклика: экстремум функции отклика находится в пределах варьирования переменных факторов. Значение экстремума составляет $Y_{opt}=1,031$. Экстремуму функции отклика соответствуют значения факторов: $x_2=0,814$ (2479,1) и $x_3=-0,784$ (0,222) при $x_1=0$ (0,04).

Проведены исследования по спектральному мониторингу и машинному обучению нейронной сети для классификации повреждений яблок. Плоды яблони (*Malus × domestica* Borkh.) (n = 100) сорта «Гала» (красно-зелёного цвета) были выращены в коммерческом саду плодородческой компании «Зоринский сад» (Обоянь, Курская область, Россия). Плоды сорваны с дерева вручную и хранились в открытой атмосфере. Изображения плодов получены в течение одной недели с момента сбора с дерева. Здоровые плоды отобраны вместе с плодами, имеющими симптомы различных повреждений, включая солнечный ожог, солнечную корку, грибковые поражения, а также механические повреждения и ушибы.

Сканирование плодов яблони осуществлялась на основе спектральных и гиперрастровых признаков, включая отражательную способность в диапазоне 550–700 нм и текстурные характеристики поверхности (рисунок 7).

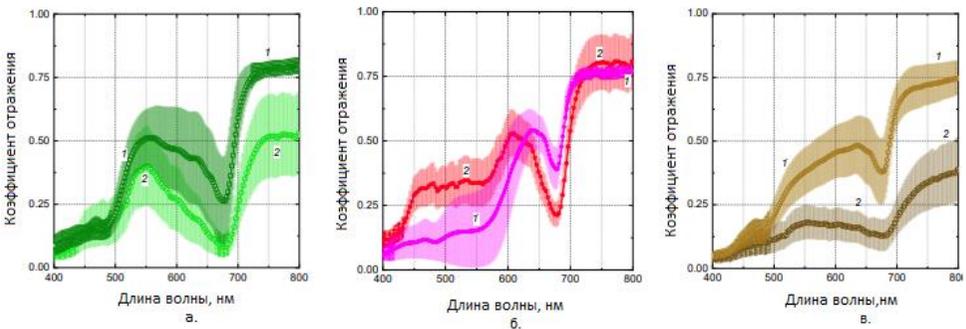


Рисунок 7 – Типичные спектры отражения (а) здоровых зеленых, (б) здоровых красных и (в) поврежденных коричневых участков поверхности плодов яблони

Спектральные и гиперспектральные признаки повреждения плодов основаны на изменениях отражательной способности тканей в различных участках спектра, что позволяет выявлять скрытые или ранние признаки заболеваний. Повреждённые плоды демонстрируют снижение отражательной способности в ближнем инфракрасном диапазоне (NIR, 700–1000 нм) вследствие разрушения клеточной структуры, потери упругости и водного дисбаланса. Например, у яблок с солнечными ожогами коэффициент отражения в диапазоне 750–800 нм может снижаться с 75–85% у здоровых плодов до менее 60%, при этом спектр теряет характерный «выпуклый» профиль, наблюдаемый у неповреждённых плодов. В видимом спектре (400–700 нм) наибольшие различия наблюдаются в зелёной (около 550 нм) и красной (около 640 нм) областях. Повреждения, такие как грибковые заболевания, изменяют хлорофиллсодержащие зоны, что приводит к смещению спектральных пиков и появлению аномалий отражения. Это позволяет использовать индексы, такие как CI700 (Chlorophyll Index на 700 нм) и mARI (modified Anthocyanin Reflectance Index) для количественного анализа изменений пигментного состава и структуры тканей.

Гиперспектральная съёмка, объединяющая пространственное и спектральное разрешение, выявляет не только интегральные спектральные характеристики, но и локализует дефекты с точностью до пикселя. Данные методы позволяют строить карты распределения повреждений на поверхности плода и выполнять кластеризацию по степени и типу повреждения. При анализе яблок с паршой и ожогами высокую эффективность демонстрируют длины волн 640, 700, 720 и 800 нм, а также производные гиперспектральные индексы, такие как mBRI и NDVI, с точностью классификации, превышающей 95% при использовании обученных нейросетевых моделей. Таким образом, спектрально-гиперспектральный анализ формирует научную и технологическую основу для создания систем объективной сортировки и диагностики качества плодов перед хранением.

Попиксельная классификация выполнялась классификаторами случайный лес (RF) и метод опорных векторов (SVM) с использованием пакета Python scikit-learn. Затем весь набор данных был разделен в соотношении 80:20 между обучающими и тестовыми наборами изображений.

Классификатор случайного леса, использующий VI + LBP, продемонстрировал наивысшую чувствительность и точность, за ним следует классификатор, применяющий необработанные значения отражательной способности без спектральной субдискретизации. Производительность классификаторов SVC и RF была близка, однако классификаторы SVC показали значительно лучшие результаты с непреобразованными признаками по сравнению с использованием VI в качестве входных данных и оказались существенно более чувствительными к спектральной субдискретизации, при этом оценки F2 снижались по мере уменьшения спектрального разрешения, чего не наблюдалось для классификаторов RF (таблица 2).

Установлено, что эффект снижения спектрального разрешения за счёт субдискретизации для классификаторов случайного леса был незначительным до тех пор, пока ширина имитируемого спектрального канала не превысила 36 нм.

Таблица 2 - Результаты попиксельной классификации

Набор функций	Точность, %	Коэффициент Коэна	F ₂ Оценка
Классификаторы случайных лесов			
Коэффициенты отражения без понижающей дискретизации + LBP	98,1 ± 2,3	0,941 ± 0,058	0,173 ± 0,290
Коэффициенты отражения + LBP + взвешивание	96,1 ± 3,6	0,888 ± 0,073	0,181 ± 0,241
LBP	90,1 ± 4,7	0,651 ± 0,101	0,000 ± 0,000 ²
VI	98,0 ± 2,1	0,940 ± 0,053	0,149 ± 0,266
VI + LBP	98,3 ± 2,1	0,948 ± 0,054	0,192 ± 0,295
VI + LBP + взвешивание	98,2 ± 2,0	0,947 ± 0,052	0,196 ± 0,294

Проведено исследование с целью улучшения контроля качества коммерческих сортов плодов посредством сравнения алгоритмов классификации гиперспектральных изображений для обнаружения поражений яблок, вызванных патогенами, включая солнечные ожоги, паршу и гниль, на трёх сортах яблок: «Ханикрисп», «Гала» и «Джонаголд». Поражения были подтверждены независимо с использованием экспертной оценки, ПЦР в реальном времени и 3D-флуориметрии.

В качестве объектов исследования использованы плоды сортов яблок «Ханикрисп» (n = 200), «Гала» (n = 200) и «Джонаголд» (n = 200). Степень поражения яблок составила от 10% до 50% от общей площади плодов. Яблоки хранились в холодильных камерах с контролируемой атмосферой при влажности 90% и температуре от -2 °C до +7 °C до момента проведения исследования.

Каждый гиперпараметр был оптимизирован с применением перекрёстной проверки на обучающей выборке для обеспечения минимизации ошибки и стабильности результатов. Анализ различных методов распознавания и классификации тестовых образцов яблок, поражённых солнечными ожогами, показал, что метод SVM демонстрирует наивысший средний показатель ARI (0,811), что свидетельствует о его относительно высокой эффективности для всех классов яблок с повреждениями от солнечных ожогов.

Наиболее чувствительным и точным оказался метод SVM. Средний показатель ARI превысил на 25,7% средние значения по всем классам. При этом алгоритм K-Means демонстрирует высокие показатели для отдельных классов, но низкие для других (таблица 3).

Таблица 3 - Результаты анализа качества методов классификации и распознавания образцов плодов яблоки, пораженных гнилью

Метод	Фон	Ветка	Гниль	Яблоко красное	Яблоко Зеленое	Средний ARI	Средняя точность (%)	Стандартное отклонение (%)
Классификация с учителем								
Двоичное кодирование	0,602	0,675	0,674	0,766	0,682	0,680	68,0	±2,9
Максимальное правдоподобие	0,726	0,736	0,715	0,800	0,780	0,751	75,1	±3,0
Минимальное расстояние	0,307	0,812	0,831	0,776	0,865	0,718	71,8	±4,5
Параллелепипед	0,512	0,623	0,736	0,806	0,723	0,680	68,0	±3,8
SVM	0,862	0,854	0,854	0,870	0,863	0,861	86,1	±1,9
Классификация без учителя								
IsoData	0,738	0,685	0,574	0,617	0,584	0,640	63,9	±3,7
K-Means	0,580	0,687	0,840	0,722	0,806	0,727	72,7	±3,2

В четвертой главе «Технико-экономическая оценка внедрения модуля оптической идентификации» произведена оценка технико-экономической эффективности применения разработанного оптического модуля в сравнении с сортировочной установкой Deltron H-Type AI Sorter for Apple. Определены основные экономические показатели: капитальные вложения и эксплуатационные затраты за год (таблица 4).

Таблица 4 - Технико-экономическая оценка внедрения модуля оптической идентификации

Исходные данные	Сортировочная установка Deltron H-Type	Сортировка с модулем оптической идентификации
Стоимость оборудования	2 500 000 руб	3 110 000 руб
Количество рабочих	1 чел	1 чел
Месячная оплата труда работника	60 000 руб	60 000 руб
Производительность за смену	8 000 кг	8 000 кг
Точность сортировки	75%-90%	98%-99%
Оптовая стоимость яблок (первый сорт)	50 руб/кг	50 руб/кг
Капитальные вложения	3 675 000 руб	4 571 700 руб
Эксплуатационные затраты	1 900 416 руб	2 455 341 руб
Общие затраты	5 575 416 руб	7 027 041 руб
Объем выпускаемой продукции	1 800 000 кг	1 960 000 кг

Экономический эффект достигается за счет высокой точности выявления брака продукции, обеспечиваемой оптическим модулем. Срок окупаемости рассчитывается на основе общих затрат и величины упущенной выгоды:

$$T = Oз / Ув = 9 \text{ месяцев} \quad (10)$$

где Оз — общие затраты, руб;

Ув — упущенная выгода, руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ технического уровня и тенденций развития систем сканирования биологических объектов показал, что применение существующих технологий проведения спектральных измерений в сочетании с нейросетевыми алгоритмами классификации имеют потенциал практического применения и способны обеспечивать высокую достоверность классификации плодов яблони с точностью до 99%. Установлено, что несоблюдение действующих стандартов (отсутствие внешних и внутренних дефектов, соответствие размерам, форме и степени зрелости,) при сортировке ведёт к увеличению потерь при хранении до 20–30%. Допуск шероховатого побурения кожицы (ржавчины) на поверхности: для высшего сорта - абсолютно не допускается; в первом сорте - более 10% поверхности плода, а для второго сорта – до 25%. Механические повреждения не допускаются в высшем сорте; в первом сорте разрешены повреждения глубиной до 0,5 см, во втором — до 1 см. Для повышения эффективности распознавания дефектов и болезней плодов яблони при поточной сортировке необходимо применение автоматизированных систем контроля качества с использованием спектрального анализа и компьютерного зрения.

2. Обоснованы параметры модуля оптической идентификации плодов яблони на основе анализа напряженного деформированного состояния конструкции и условий беспрепятственного движения плодов по роликовому транспортеру:

- максимальный прогиб в центральной зоне рельсовых направляющих не превышает 0,5 мм;

- максимальное количество плодов на 1 пог.м. не более 12 шт. яблоч, диаметр зазора D_p между роликами транспортера выбран в диапазоне от 0,11-0,125 м из условия отсутствия защемления плодов, а также их потерь;

- движение каретки с камерой, плодов по валковому столу и процесс сканирования синхронизированы и осуществляются со скоростью 0,05–0,07 м/с.

3. Разработан модуль оптической идентификации, включающий систему рельсовых -6 шт и винтовых направляющих – 3 шт., платформ на профильных опорах – 3 шт., гиперспектральная камера сканирующего типа – 1шт. датчики обратной связи – 3 шт., контроллер ATmega168 – 1 шт. Модуль выполняет передвижение камеры со скоростью 0,01 – 0,1 м/с над роликовым транспортером по заданным в программе микроконтроллера точкам в пространственной системе координат.

4. Разработана методика, позволяющая осуществить сбор, хранение, обработку и анализ гиперспектральных изображений. Полученные в результате исследований спектральные и гиперрастровые характеристики показали, что повреждения и болезни плодов яблони, приводят к снижению коэффициента отражения в диапазоне 550–700 нм, который чувствителен к содержанию пигментов хлорофилла и антоцианов. На длинах световых волн 550 нм и 700 нм наблюдается снижение отражения в среднем на 15–20%, что указывает на утрату фотосинтетических пигментов.

5. В результате экспериментальных исследований прототипа модуля оптической идентификации для сортировки плодов установлено, что:

- оптимальная скорость перемещения каретки с гиперспектрометром, при которой обеспечивалось получение качественных гиперспектральных изображений, составила $V_{\text{кар}} = 0,4 \text{ М/с}$; значение светового потока системы освещения рабочей поверхности роликового транспортера 2479,1 лм; оптимальное расстояние от объектива камеры до плода - 0,222 м;

- классификатор случайного леса (RF), обученный на признаках, включающих вегетационные индексы и локальные бинарные шаблоны (VI + LBP), продемонстрировал высокую точность 97–98,2% в распознавании повреждённых плодов на малой выборке до 100 шт. Данный метод отличается вычислительными и временными затратами, что увеличивает процесс распознавания плодов до 30 с.

- контролируемые (двоичное кодирование, максимальное правдоподобие, минимальное расстояние, параллелепипед, метод опорных векторов) методы классификации обладают более высокой точностью, чем неконтролируемые (метод самоорганизации и К-средних) методы классификации гиперспектральных изображений для выявления повреждений яблок. Наиболее сбалансированным по точности (до 86%) и вычислительной эффективности на большой выборке оказался метод опорных векторов (SVM).

6. Проведена сравнительная технико-экономическая оценка разработанного модуля оптической идентификации на основе гиперспектральной съемки с автоматизированной сортировочной установкой с RGB камерой. Разница в точности распознавания бракованных плодов яблони в 8% позволила количественно оценить упущенную выгоду, в результате чего срок окупаемости внедрения разработанного модуля составил 9 месяцев.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы:

1. Рекомендуется внедрение разработанного оптического модуля гиперспектральной идентификации плодов яблони в автоматизированные сортировочные линии предприятий АПК. Благодаря П-образной конструкции модуль легко устанавливается над ленточными или роликовыми конвейерами без необходимости доработки основного оборудования.

2. Эффективно использовать модели, обученные на основе метода опорных векторов (Support Vector Machine, SVM), которые продемонстрировали наибольшую эффективность при классификации повреждений плодов по совокупности спектральных и текстурных признаков, извлечённых из гиперспектральных изображений.

3. Разработана нейронная сеть на архитектуре YOLO, осуществляющая идентификацию яблок и их нумерацию. Совмещение данной системы с RGB-сенсором гиперспектральной камеры позволяет завершить формирование полноценного сортировочного модуля, включающего рабочий орган для автоматической отбраковки повреждённых плодов яблони.

4. Возможна адаптация разработанной установки к другим видам плодовой продукции (картофелем, грушам, персикам, томатам) путём повторного обучения модели на соответствующих датасетах, что расширяет сферу применения решения в сельском хозяйстве.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в журналах, включенных в перечень рецензируемых научных изданий ВАК при Минобрнауки России:

1. **Чиликин А. Д.** Оптимизация параметров освещения в процессе съёмки модуля оптической идентификации/ **А. Д. Чиликин, Д. О. Хорт**// Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2025. - №3. С. 28-35 DOI: 10.22314/2073-7599-2025-19-3-43-50.

2. **Чиликин А. Д.** Определение оптимальных параметров гиперспектральной съемки при сортировке плодов яблони / **А. Д. Чиликин, Д. О. Хорт** // Технический сервис машин. – 2025. – Т. 63. №3. С. 93-101. DOI: 10.22314/2618-8287-2025-63-3-93-101.

3. Хорт Д. О. Анализ гиперспектральных снимков плодов яблони для автоматизированной сортировки / **Д. О. Хорт, А. Д. Чиликин, Б. М. Шурыгин** // Садоводство и виноградарство. – 2023. – № 6. С. 41-50. DOI 10.31676/0235-2591-2023-6-41-50.

Публикации в международных базах данных:

4. **Chilikin A.** Determination of optimal imaging parameters of hyperspectral images using the identification module / **A. Chilikin, D. Pupin** // BIO Web of Conferences. – 2024. – V. 145. P. 04047. DOI 10.1051/bioconf/202414504047.

5. Khort D. O. Enhancing Sustainable Automated Fruit Sorting: Hyperspectral Analysis and Machine Learning Algorithms / **D. O. Khort, A. Kuttyrev, I. Smirnov, A. Andriyanov, R. Filippov, A. Chilikin, M. E. Astashev, E.A. Molkova, R. M. Sarimov, T.A. Matveeva, S. Gudkov** // Sustainability. – 2024. – V. 16. № 22. P. 10084. DOI 10.3390/su162210084.

6. Pupin D. Development of control system for robotic apple harvesting device / **D. Pupin, A. Chilikin** // Voronezh: EDP Sciences - 2023. – V. 458. P. 10022. DOI 10.1051/e3sconf/202345810022.

7. Shurygin B. Mutual Augmentation of Spectral Sensing and Machine Learning for Non-Invasive Detection of Apple Fruit Damages / **B. Shurygin, I. G. Smirnov, A. Chilikin, D.O. Khort, A.I. Kuttyrev, S. Zhukovskaya, A. Solovchenko**// Horticulturae. – 2022. – V. 8. No. 12. P. 1111. DOI 10.3390/horticulturae8121111.

-патенты на изобретение:

8. Патент № 2780053 С1 Российская Федерация, МПК G01N 21/892, B07C 5/342, A23N 15/00. Линия с оптической системой идентификации макро- и микроповреждений тканей корнеклубнеплодов и яблок: № 2022109144: заявл. 06.04.2022: опубл. 19.09.2022 / **А. С. Дорохов, А. В. Сибирев, А. Г. Аксенов, Д. О. Хорт, М. А. Мосяков, Н. В. Сазонов, А. Д. Чиликин, С. В. Семичев, И. А. Приходько, С. В. Лазовский**; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ".

- свидетельства о государственной регистрации базы данных:

9. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024624492 Российская Федерация. База данных мультиспектральных и гиперспектральных изображений здоровых и поражённых болезнями частей растений: № 2024624241: заявл. 08.10.2024: опубл. 16.10.2024 / Д. О. Хорт, А. И. Кутырев, И. Г. Смирнов, Р. А. Филиппов, **А. Д. Чиликин**, С. В. Семичев; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ».

10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2023624900 Российская Федерация. База данных спектральных характеристик дефектов плодов яблок и клубней картофеля для оптической сортировки: № 2023624645 : заявл. 08.12.2023: опубл. 22.12.2023 / Д. О. Хорт, А. И. Кутырев, И. Г. Смирнов, Р. В. Вершинин, **А. Д. Чиликин**, Р. А. Филиппов, А. Г. Аксенов, А. В. Сибирев, С. В. Семичев, М. А. Мосяков; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ».