

На правах рукописи

Николаев Михаил Юрьевич



**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО
НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ
СТАЛЬНЫХ ГРУЗОПОДЪЕМНЫХ КАНАТОВ**

*Специальность 2.3.3. Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами*

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент

Кульчицкий Александр Александрович

Официальные оппоненты:

Шишляков Владислав Федорович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», институт киберфизических систем, директор;

Ковалёв Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», кафедра автоматизации технологических процессов и производств, заведующий кафедрой.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет», г. Екатеринбург

Защита диссертации состоится **15 сентября 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.12 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 15 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ВАСИЛЬЕВА
Наталья Васильевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В горнодобывающей отрасли стальные грузоподъёмные канаты являются жизненно важным элементом: они используются в шахтных подъёмниках, клетевых системах и канатных дорогах для транспортировки горной породы и персонала. Интенсивные циклические нагрузки, агрессивные среды приводят к высоким рискам скрытых повреждений и усталостных разрушений. Если дефекты не будут своевременно выявлены, они могут представлять серьёзную угрозу безопасности, приводить к значительным финансовым потерям.

Согласно отчёту NDT Technology, в период с 1999 по 2013 годы из-за разрушения стальных канатов погибли свыше 60 человек и более 65 получили травмы в различных отраслях — включая шахтные подъёмники, подъёмные устройства и канатные дороги. Несвоевременное обнаружение повреждений канатов приносит материальные убытки к примеру: отказ крупногабаритных стальных канатов обернулся многомиллионными убытками: 116 млн USD при обрыве на платформе Petronius (1998), 55 млн USD при аварии в Roncador Field (2014).

Это подчёркивает необходимость перехода от периодических осмотров к автоматизированным системам непрерывного контроля технического состояния канатов.

Традиционный метод контроля стальных канатов основан преимущественно на ручной визуальной инспекции, которая имеет ряд ограничений: высокую субъективность, низкую скорость диагностики и сильную зависимость от опыта инспектора. Магнитные методы контроля позволяют выявлять внутренние и внешние дефекты каната по изменению магнитного поля, однако также не являются универсальным решением и имеют ограничения по чувствительности, интерпретации сигналов и условиям применения.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами разработки методов бесконтактной дефектоскопии грузоподъёмных канатов (ГК) занимались отечественные НИИ, такие как Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), Институт проблем управления

имени В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), Научно-исследовательский институт горной механики имени Н.А. Чинакала СО РАН, Научно-исследовательский институт машиностроения (НИИМаш).

Весомый вклад в изучение видов дефектов и механизмов их образования внесли следующие ученые: Борисов Ю.Н., Костенко В.А., Сидоров А.И., Петренко И.М., Иванов С.В., Лебедев Н.А., Захаров М.П., Федоров Д.А.

Иностранные авторы, исследовавшие вопросы повышения эффективности идентификации дефектов ГК: Doe J., Müller H., Dupont M., Tanaka H., Smith A., Rodriguez C., Wei L., Rossi P.

Объект исследования – системы автоматизированного контроля состояния стальных грузоподъемных канатов.

Предмет исследования – методы и алгоритмы повышения достоверности автоматизированных систем контроля состояния стальных грузоподъемных канатов.

Цель работы – повышение достоверности автоматизированных систем контроля состояния стальных грузоподъемных канатов.

Идея заключается в объединении оптического (реализуемого системой технического зрения) и магнитометрического каналов в единую синхронизированную систему контроля состояния грузоподъемных канатов, в которой реализованы интеллектуальные алгоритмы обработки изображений и сигналов (выделение информативных признаков, нейросетевое детектирование и классификация поверхностных дефектов, классификация по геометрическому профилю толщины, а также корреляционная временно-пространственная синхронизация и согласование результатов), обеспечивающие унифицированное представление результатов контроля и снижение числа ложных срабатываний.

Задачи исследования:

1. Проанализировать дефекты грузоподъемных канатов как объект автоматизированного технического контроля, исследовать условия их возникновения и информативность существующих средств неразрушающего контроля, а также обосновать применение комплексной системы диагностики на основе разнородных по физической природе каналов измерения.

2. Научно обосновать применение технического зрения для реализации автоматизированной системы контроля состояния грузоподъемных канатов и предложить компоновочные решения, обеспечивающие получение информации о состоянии поверхности каната в реальном времени.

3. Исследовать эффективность применения сверточных нейросетевых моделей для детектирования и классификации поверхностных повреждений канатов и разработать алгоритмы предобработки видеоданных, повышающие устойчивость автоматизированного распознавания дефектов к изменениям внешних условий съёмки.

4. Разработать алгоритм оценки степени истончения грузоподъемного каната по данным оптического канала, позволяющий в автоматическом режиме выявлять и количественно оценивать изменения линейных размеров поперечного сечения каната.

5. Научно обосновать метод автоматизированного контроля состояния грузоподъемных канатов на основе анализа профиля толщины по длине каната, обеспечивающий формирование информативных признаков и классификацию дефектов с использованием алгоритмов машинного обучения.

6. Разработать метод и алгоритмическое обеспечение комплексной автоматизированной диагностики грузоподъемных канатов, включающие синхронизацию и согласование данных оптического и магнитометрического каналов в единой координатно-временной системе и формирование интегрального диагностического решения в контуре автоматизированного контроля.

Научная новизна работы:

1. Научно обосновано применение системы технического зрения для реализации автоматизированного контроля с распознаванием дефектов и повреждений грузоподъемных канатов сверточной нейронной сетью и предобработкой видеоданных, повышающей устойчивость автоматизированного распознавания к изменениям внешних условий съёмки.

2. Установлена зависимость изменений размеров наблюдаемого профиля сечений стального грузоподъемного каната в зависимости от типа повреждений.

3. Разработаны методологические основы комплексного контроля дефектов грузоподъемных канатов, сочетающие оптический и магнитный методы и позволяющие выявлять как поверхностные дефекты, так и внутренние повреждения.

Соответствие паспорту специальности. Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами по пунктам:

2. «Автоматизация контроля и испытаний».

11. «Методы создания, эффективной организации и ведения специализированного информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др., включая базы данных и методы их оптимизации, промышленный интернет вещей, облачные сервисы, удаленную диагностику и мониторинг технологического оборудования».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Предложены компоновочные решения автоматизированной системы контроля состояния стальных грузоподъемных канатов.

2. Разработан алгоритм определения степени истончения каната.

3. Разработана база данных типовых повреждений тросов для обучения нейронных сетей в рамках угольных шахт Китая (свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022621454).

4. Результаты диссертационной работы рекомендованы в ООО «Лаборатория инжиниринга» (акт внедрения от 19.12.2025 г.).

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования является системный подход, который включает в себя анализ и научное обобщение работ в области оптического и магнитного контроля геометрических параметров. Теоретические исследования опираются на физические принципы геометрической оптики, магнитометрических методов неразрушающего контроля, теории цифровой обработки сигналов и методов машинного обучения. Экспериментальные исследования выполнены на специально созданном стенде.

Положения, выносимые на защиту:

1. Алгоритм обработки изображений автоматизированной системы контроля состояния стальных грузоподъемных канатов на основе сверточной нейронной сети позволяет осуществлять автоматическое обнаружение и классификацию поверхностных дефектов стальных грузоподъемных канатов с достоверностью от 80 до 89 % в зависимости от типа повреждения.

2. Метод обработки изображений на основе анализа профиля толщин каната по длине с применением метода градиентного бустинга позволяет осуществлять автоматическое обнаружение и классификацию поверхностных дефектов стальных грузоподъемных канатов с достоверностью от 88 до 93 % в зависимости от типа повреждения.

3. Алгоритм комплексного контроля дефектов и повреждений грузоподъемных канатов, осуществляющий синхронную обработку данных, получаемых с помощью магнитометрической подсистемы и подсистемы технического зрения, позволяет осуществлять оперативный контроль внутренних и поверхностных дефектов с достоверностью от 86 до 98 % в зависимости от типа повреждения.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена использованием стандартных методов математического моделирования, сходимостью моделируемых и экспериментальных зависимостей, результатами экспериментальных исследований.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных: XIX Международный форум-конкурс студентов и молодых ученых «Актуальные проблемы недропользования» (22-26 мая 2023 года, г. Санкт-Петербург); Международная научная конференция «Вопросы фундаментальных и прикладных научных исследований» (7 февраля 2024 года, г. Мурманск); XX Всероссийская конференция-конкурс студентов выпускного курса и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (01-07 декабря

2024 года, г. Санкт-Петербург); XLV Международная научная конференция современные методы и инновации в науке (10 декабря 2025 года, г. Санкт-Петербург).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, проведении экспериментов, разработке алгоритмов, метода и апробации результатов.

Публикации. Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 6 печатных работах, в том числе в 2 статьях - в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, списка литературы, включающего 113 наименований, и 2 приложений. Диссертация изложена на 137 страницах машинописного текста, содержит 23 рисунка и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель, задачи работы и научная новизна, раскрыты теоретическая и практическая значимости исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены основные виды повреждений и их сочетания, а также классификация дефектов по характеру проявления (локальные и распределённые потери сечения), выполнен анализ современных автоматизированных систем диагностики дефектов стальных канатов. Систематизированы и сопоставлены методы неразрушающего контроля (прежде всего электромагнитные и оптические, а также ультразвуковые, акустической эмиссии и др.), выделены их достоинства, ограничения и причины слабой промышленной применимости ряда подходов. На основе сравнительного анализа

сформулированы перспективные направления развития (шумоподавление, интеллектуальная/количественная диагностика) и обоснована целесообразность комплексного решения, объединяющего техническое зрение и магнитный контроль для повышения полноты выявления дефектов, включая внутренние.

Во второй главе обоснован выбор способов формирования и обработки изображений. Сформулированы функциональные задачи и технические требования к системе технического зрения, проанализированы ограничения традиционных оптических схем. Выполнено сравнение компоновочных решений оптических систем. Приведены расчётные соотношения для проектирования геометрии зеркальной схемы и обоснованы требования к выбору камеры и объектива для достоверного выявления малых дефектов. Реализован метод автоматизированного контроля поверхностных дефектов на основе сверточных нейронных сетей; разработан метод предварительной обработки изображений, повышающий устойчивость распознавания к изменениям условий съёмки, и экспериментально подтверждена эффективность нейросетевой модели EfficientDet-D2.

В третьей главе разработана и исследована оптическая подсистема автоматизированного контроля истончения грузоподъёмных канатов. Разработан метод контроля, основанный на анализе линейного профиля толщины поперечного сечения каната, позволяющий формировать интерпретируемые геометрические признаки и выполнять классификацию дефектов с использованием алгоритма градиентного бустинга CatBoost.

В четвертой главе предложен метод комплексной диагностики, объединяющий результаты оптического контроля и магнитного контроля на основе процедур согласования, нормирования признаков и интегрального правила принятия решения о техническом состоянии каната. Выполнена оценка эффективности комбинирования по показателям полноты и достоверности выявления дефектов, а также устойчивости к помехам, и определены области преимущественного применения отдельных каналов и их совместной обработки. Рассчитаны ожидаемые технико-экономические эффекты от внедрения системы (снижение вероятности пропуска опасных дефек-

тов, сокращение внеплановых простоев и затрат на контроль) и сформулированы выводы о целесообразности промышленного применения комплексного подхода.

В заключении сформулированы выводы по результатам представленных в работе теоретических и экспериментальных исследований.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Алгоритм обработки изображений автоматизированной системы контроля состояния стальных грузоподъемных канатов на основе сверточной нейронной сети позволяет осуществлять автоматическое обнаружение и классификацию поверхностных дефектов стальных грузоподъемных канатов с достоверностью от 80 до 89 % в зависимости от типа повреждения.

В данной работе под достоверностью автоматизированного контроля понимается степень соответствия сформированного диагностического решения фактическому состоянию каната. Количественно она определяется по нормализованной матрице коллизий: диагональные элементы отражают долю верно классифицированных состояний.

Исследования показали, что для автоматизации обнаружения и классификации типовых поверхностных дефектов каната, включая разрыв, абразивный износ и изгиб, возможно применение сверточной нейронной сети, обученной на размеченных изображениях поверхности, полученных при варьировании условий съемки и ориентации образца. Общий подход к формированию данных и визуальные примеры кадров с дефектами, используемых при подготовке обучающей выборки, показаны на экспериментальном материале (рисунок 1).

Выполнена разметка изображений для обучения, сформирован набор данных порядка 1000 кадров на каждый тип дефекта, выполнено сравнение моделей и выбор основной модели по комплексному показателю, учитывающему качество идентификации и скорость обработки; в качестве основной модели принята EfficientDet D2 768×768, а результат детектирования дефекта в кадре с указанием

локализации иллюстрирует корректность выбранного подхода к обнаружению и классификации (рисунок 2).

В таблице 1 показано, что на достоверность распознавания влияют внешние условия съемки, в первую очередь расстояние до объекта контроля и освещенность, что проявляется снижением коэффициента выделения дефектов при отклонении условий от стандартных.

Таблица 1 – Коэффициент выделения дефектов нейронной сетью

Дефект	Условия распознавания				
	Стандартные	изменение расстояния		изменения освещенности	
		–20 %	+20 %	–50 %	+50%
Разрыв	0,88	0,82	0,84	0,85	0,86
Абразивный износ	0,84	0,77	0,78	0,82	0,76
Изгиб	0,79	0,73	0,73	0,77	0,78

Для повышения достоверности распознавания предложен усовершенствованный метод обработки изображений перед подачей в нейронную сеть, включающий удаление фоновой составляющей попиксельным сравнением с базовым кадром, фильтрацию с удалением одиночных пикселей и масштабирование полезной области кадра; алгоритм предобработки представлены схемой (рисунок 3).

Эффективность обучения и корректность процесса оптимизации подтверждаются динамикой функций потерь по основным компонентам, включая потери классификации и локализации, а также вклад регуляризации и итоговую суммарную ошибку, что демонстрируется соответствующими графическими зависимостями (рисунки 4, 5, 6).

Наглядный пример преобразования исходного изображения и результата распознавания после выполнения предобработки приведен как иллюстрация достижения требуемого качества (рисунок 7).

Применение комбинированной предобработки совместно с выбранной моделью детектирования снижает влияние внешних факторов и обеспечивает коэффициенты выделения дефектов, соответствующие достоверности распознавания от 80 до 89 % в зависимости от типа повреждения (таблица 2).

Таблица 2 – Коэффициент выделения дефектов нейронной сетью при предварительной обработке изображения дефекта

Дефект	Условия распознавания				
	Стандарт-ные	изменение расстояния		изменения освещенности	
		–20 %	+20 %	–50 %	+50%
Разрыв	0,89	0,87	0,88	0,86	0,87
Абразивный износ	0,84	0,83	0,85	0,84	0,82
Изгиб	0,80	0,80	0,79	0,79	0,80

2. Метод обработки изображений на основе анализа профиля толщин каната по длине с применением метода градиентного бустинга позволяет осуществлять автоматическое обнаружение и классификацию поверхностных дефектов стальных грузоподъемных канатов с достоверностью от 88 до 93 % в зависимости от типа повреждения.

Наличие участков истончения является информативными показателем качества каната и его эксплуатационной пригодности, поскольку непосредственно отражает изменение несущей способности и степень деградации поверхности стальных грузоподъемных канатов. Кроме того, данная информация может быть использована для повышения достоверности контроля дефектов за счет преобразования в интерпретируемый геометрический дескриптор — одномерный профиль толщины каната вдоль его продольной оси. После предварительной обработки изображения (получение бинарной маски и выделение геометрически значимых контуров) профиль формируется последовательным сканированием вдоль длины: для каждой горизонтальной координаты вычисляется расстояние между верхней и нижней границами пикселей, представляющих контур каната, в результате чего получается сигнал, отражающий продольные вариации размеров поперечного сечения (рисунок 8).

Общая структура перехода «изображение → профиль → признаки → классификация» и место применения классификатора показаны на рисунке 9.

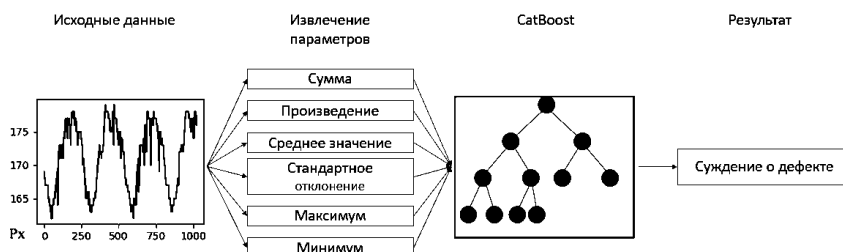


Рисунок 9 – Извлечение параметров и классификация дефекта

Обоснование применимости профиля толщины как диагностического признака подтверждено двухступенчатой валидацией на синтетических и реальных данных. Экспериментальная база включает четыре диагностические категории состояния стального каната (без дефекта, изгиб, залом, разрыв проволоки), примеры которых приведены на рисунке 10; съёмка реальных образцов выполнялась цифровой камерой с разрешением 2592×1944 при кольцевом светодиодном освещении и контрастном фоне, при этом каждый образец регистрировался вдоль одного метра с шагом 3–5 мм, а для повышения устойчивости к ракурсу дополнительно выполнялась съёмка с восемью направлений (через 45°).

На синтетических изображениях продемонстрирована различимость профилей между типами повреждений (рисунок 11): для неповреждённого каната формируется регулярный периодический сигнал, заломы проявляются резкими локальными сужениями, разрывы — выраженными провалами толщины, изгибы — плавными асимметричными отклонениями профиля. На реальных изображениях показана устойчивость извлечения профиля в условиях загрязнения, смазки и отклонений освещённости от первоначальной (рисунок 12).

Достоверность классификации подтверждается результатами многоклассовой оценки модели CatBoost: значения метрик по классам и обобщённая оценка качества приведены в таблице 3 и составляют 0,88 для «изгиба», 0,90 для «залома» и 0,93 для «разрыва», что соответствует заявленному диапазону 88–93% в зависимости от типа дефекта; характер ошибок и близость отдельных классов дополнительно отражены в нормализованной матрице ошибок (рисунок 13).

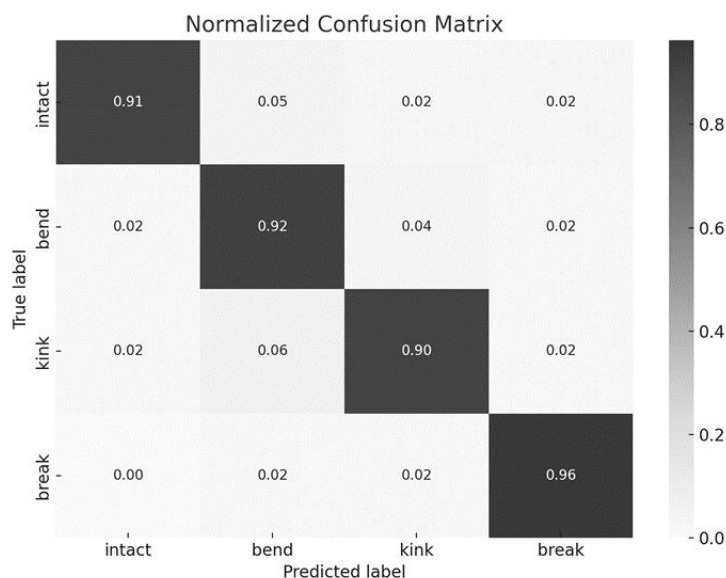


Рисунок 13 – Нормализованная матрица ошибок

Интерпретируемость решения обеспечивается использованием агрегированных статистических признаков профиля (в частности, максимум, стандартное отклонение, сумма), вклад которых в итоговую классификацию количественно подтверждён оценкой важности признаков (таблица 4), что позволяет связать тип поверхностного дефекта с характером локальных и интегральных изменений толщины по длине каната.

Таблица 4 – Вклад статистических признаков профиля толщины в классификационное решение модели CatBoost

Признак	Важность (PredictionValuesChange), %
Максимальная толщина	27,96
Стандартное отклонение толщины	27,95
Суммарная толщина по профилю	26,23
Средняя толщина	13,89

Продолжение таблицы 4

Признак	Важность (PredictionValuesChange), %
Минимальная толщина	4,00
Произведение значений толщины по профилю	0,00

3. Алгоритм комплексного контроля дефектов и повреждений грузоподъемных канатов, осуществляющий синхронную обработку данных, получаемых с помощью магнитометрической подсистемы и подсистемы технического зрения, позволяет осуществлять оперативный контроль внутренних и поверхностных дефектов с достоверностью от 86 до 98 % в зависимости от типа повреждения.

Возможность контроля внутренних повреждений и повышение достоверности оперативного контроля состояния грузоподъемного каната обеспечивается за счёт синхронной обработки и согласованного использования данных, получаемых от подсистемы технического зрения и магнитометрической подсистемы, объединённых единым алгоритмом (рисунок 14).

Магнитометрическая подсистема обеспечивает выявление внутренних дефектов по изменениям магнитного поля, возникающим при нарушении сплошности металла и локальной потере сечения, тогда как подсистема технического зрения ориентирована на обнаружение поверхностных повреждений и геометрических изменений каната по данным визуального контроля поверхности и анализа изображений поперечного сечения.

В подсистеме технического зрения реализован комбинированный подход, включающий прямую классификацию изображений поверхности, с применением сверточной нейронной сети и классификацию статистических признаков, сформированных по одномерному профилю толщины поперечного сечения с применением градиентного бустинга CatBoost. Такое построение оптического канала повышает устойчивость распознавания поверхностных дефектов при вариациях условий наблюдения и обеспечивает формирование информативных признаков для различения типов повреждений, связанных с нарушением размеров, формы и состояния внешней поверхности каната.

Синхронная обработка результатов магнитометрической и оптической подсистем обеспечивается привязкой данных к общей пространственной координате по сигналам инкрементального энкодера с учетом постоянного конструктивного смещения между измерительными модулями; вводится поправка на сдвиг вдоль каната $\Delta x=0,30$ м, что позволяет соотносить решения разных каналов с одним и тем же участком контролируемого объекта и выполнять их сопоставление в едином координатном представлении.

Интеграция разнородных данных выполняется на уровне принятия решения посредством объединения вероятностных оценок, полученных от нейросетевого классификатора изображений поверхности, оптического классификатора CatBoost по признакам профиля толщины и магнитометрического классификатора. При объединении используются весовые коэффициенты, отражающие различную информативность каналов для разных типов повреждений; значения весов и принцип их применения (матрица доверия) приведены в таблице 5. Слияние данных обеспечивает повышение достоверности распознавания за счет взаимного подтверждения дефектов независимыми подсистемами и снижает влияние помех и локальных искажений, характерных для каждого отдельного метода контроля.

Таблица 5 – Матрица доверия

Тип дефекта	Оптический канал		Магнитометрический канал
	CNN	CatBoost	
Внутренний дефект	0,1	0,1	0,8
Изгиб	0,45	0,45	0,1
Залом	0,45	0,45	0,1
Разрыв	0,4	0,4	0,2

Экспериментальная проверка разработанного алгоритма на контрольных участках каната с дефектами и на бездефектных участках показала, что комбинированная обработка данных магнитометрической подсистемы и подсистемы технического зрения обеспечивает достоверность распознавания в диапазоне 96–98 % в зависимости от типа повреждения; итоговые значения точности по отдельным каналам и по комбинированной подсистеме приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Показатели эффективности классификации

Тип дефекта	Оптический канал		Магнитометрический канал	Общая точность
	CNN	CatBoost		
Изгиб	0,80	0,88	0,07	0,96
Залом	0,84	0,90	0,12	0,96
Разрыв	0,89	0,93	0,86	0,97
Без дефекта	0,91	0,88	0,97	0,98
Внутренний	0,02	0,06	0,84	0,86

Полученные результаты подтверждают возможность оперативного контроля как внутренних дефектов по магнитометрическим данным, так и поверхностных повреждений по данным технического зрения при их синхронной обработке и согласованной интерпретации в едином алгоритмическом контуре.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача повышения достоверности автоматизированного контроля дефектов и повреждений грузоподъемных стальных канатов за счёт комплексирования оптического контроля (технического зрения) и магнитометрического неразрушающего контроля, а также разработки и внедрения алгоритмов интеллектуальной обработки данных.

В ходе исследования получены следующие основные результаты и выводы:

1. Выполнен анализ дефектов грузоподъемных канатов как объекта автоматизированного технического контроля и показано, что их повреждаемость носит комплексный характер и включает как наружные локальные нарушения, так и внутренние дефекты, а также интегральную потерю металлического сечения. Установлено, что существующие средства неразрушающего контроля обладают различной информативностью по отношению к разным типам дефектов, вследствие чего для повышения достоверности диагностики обосновано применение комплексной системы контроля, основанной на разнородных по физической природе каналах измерения.

2. Научно обоснована возможность применения технического зрения для построения автоматизированной системы контроля состояния грузоподъёмных канатов. Показано, что оптический канал позволяет получать информацию о состоянии поверхности каната и геометрии его поперечного сечения в реальном времени без остановки движения и демонтажа контролируемого объекта. Предложенные компоновочные решения обеспечивают формирование информативного изображения, пригодного для последующего автоматизированного извлечения диагностических признаков.

3. Исследована эффективность применения моделей машинного обучения и алгоритмов обработки изображений для детектирования и классификации поверхностных повреждений канатов. Установлено, что разработанные процедуры предобработки видеоданных повышают устойчивость распознавания дефектов к изменениям освещённости, шумам и искажениям съёмки. Показано, что методы компьютерного зрения и интеллектуального анализа изображений являются эффективными средствами автоматизированной классификации внешних повреждений каната, прежде всего таких как разрыв, залом и изгиб.

4. Разработан алгоритм автоматизированной оценки степени истончения грузоподъёмного каната по данным оптического канала, основанный на анализе профиля толщины поперечного сечения. Установлено, что предложенный подход позволяет не только выявлять наличие утонения, но и выполнять его количественную оценку. По результатам апробации на синтетически сгенерированных данных подтверждена высокая чувствительность алгоритма к ранним стадиям деградации: при диаметре каната 6 мм абсолютная погрешность определения толщины составила до 0,19 мм, а минимальное моделируемое истончение 2,5 % уверенно фиксировалось в пределах допустимого отклонения.

5. Научно обоснован метод автоматизированного контроля состояния грузоподъёмных канатов на основе анализа профиля толщины по длине каната и показано, что одномерный профиль толщины является информативным признаком для формирования диагностических признаков и последующей классификации дефектов с использо-

ванием алгоритмов машинного обучения. Установлено наличие характерных паттернов профиля для различных состояний каната, а применение модели градиентного бустинга CatBoost подтвердило возможность достоверной автоматической классификации по выделенным статистическим признакам. Вместе с тем показано, что данные методы, будучи эффективными при классификации внешних повреждений и геометрических отклонений, в значительной степени не позволяют обнаруживать внутренние дефекты, не имеющие выраженного внешнего проявления.

6. Разработаны методические основы комплексной автоматизированной диагностики грузоподъемных канатов, предусматривающие необходимость синхронизации и согласования данных оптического и магнитометрического каналов в единой координатно-временной системе с формированием интегрального диагностического решения. Показано, что оптический канал целесообразно использовать для выявления и количественной оценки наружных дефектов, изменений геометрии и истончения каната, тогда как обнаружение внутренних повреждений требует привлечения дополнительных методов неразрушающего контроля.

Полученные результаты могут быть использованы при создании и модернизации автоматизированных систем диагностики стальных канатов на объектах горнодобывающей промышленности и иных отраслях.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Кульчицкий, А.А. Оптический контроль повреждений грузоподъемных канатов металлургического технологического оборудования / А.А. Кульчицкий, **М.Ю. Николаев**, И.А. Бригаднов, Л.А. Русинов // Инженерный вестник Дона. - 2025. - № 3 (123). - С. 133-153.

2. Кульчицкий, А.А. Система комплексного контроля состояния грузоподъемных стальных канатов на основе машинного обучения и синхронизированной обработки сигналов оптического и магнитного каналов / А.А. Кульчицкий, **М.Ю. Николаев**// Инженерный вестник Дона. - 2026. - № 3 (135). – 21 с.

Публикации в изданиях, входящих в международные базы данных и системы цитирования Scopus:

3. Кульчицкий, А.А. Распознавание дефектов грузоподъемных канатов металлургического оборудования оптическим методом с помощью нейронных сетей/ А.А. Кульчицкий, О.К. Мансурова, **М.Ю. Николаев**// Черные металлы. - 2023. - № 3. - С.81-88.

4. Kulchitskiy, A Method for Monitoring the Condition of Steel Wire Ropes Based on the Analysis of Changes in the Linear Dimensions of Their Cross-Sections/ A. Kulchitskiy, **M. Nikolaev** // Mining. - 2025. – Vol. 5, No. 4. – 22 p.

Публикации в прочих изданиях:

5. **Николаев, М.Ю.** Комплексная система оптического контроля дефектов грузоподъемных канатов / **М.Ю. Николаев** // Вопросы фундаментальных и прикладных научных исследований: Сборник статей международной научной конференции, Мурманск, 07 февраля 2024 года. – СПб: ГНИИ «Нацразвитие», 2024. – С. 21-23.

6. Кульчицкий, А.А. Сравнительный анализ методов распознавания повреждений грузоподъемных стальных канатов при контроле их состояния оптическими средствами / А.А. Кульчицкий, **М.Ю. Николаев** // Современные методы и инновации в науке: Сборник статей XLV международной научной конференции, Санкт-Петербург, 10 декабря 2025 года. – СПб: ГНИИ «Нацразвитие», 2025. – С. 84-87

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

6. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022621454 Российская Федерация. База данных типовых повреждений тросов для обучения нейронных сетей в рамках угольных шахт Китая. Заявка № 2022621310: заявл. 09.06.2022: опубл. 20.06.2022 / Ю. Ли, А.А. Кульчицкий, М.Ю. Николаев; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 531 КБ

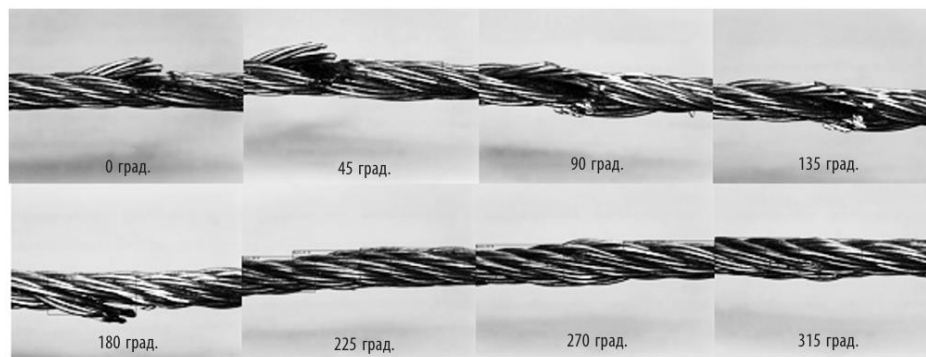


Рисунок 1 – Серия изображений дефекта «разрыв»

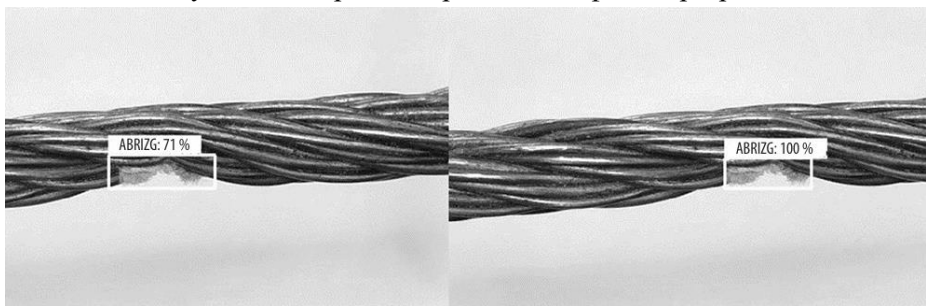


Рисунок 2 – Обнаружение дефекта каната с использованием нейронной сети

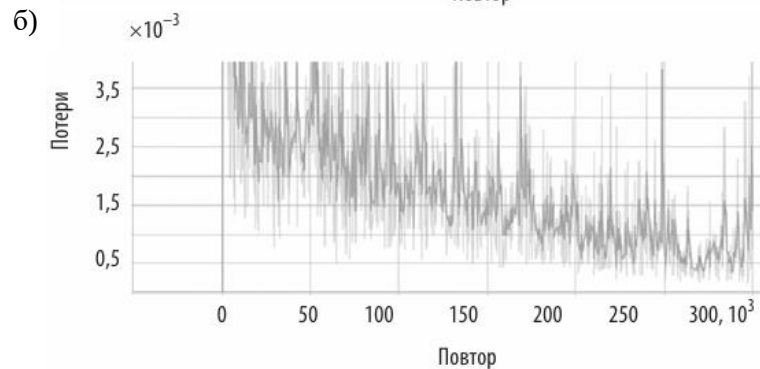
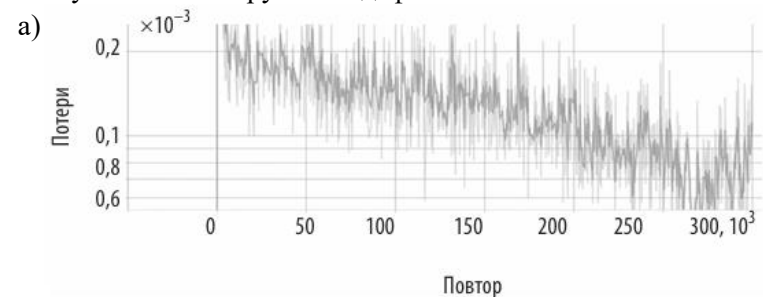


Рисунок 4 – Потери классификации (а) и локализации (б) при обучении нейронной сети

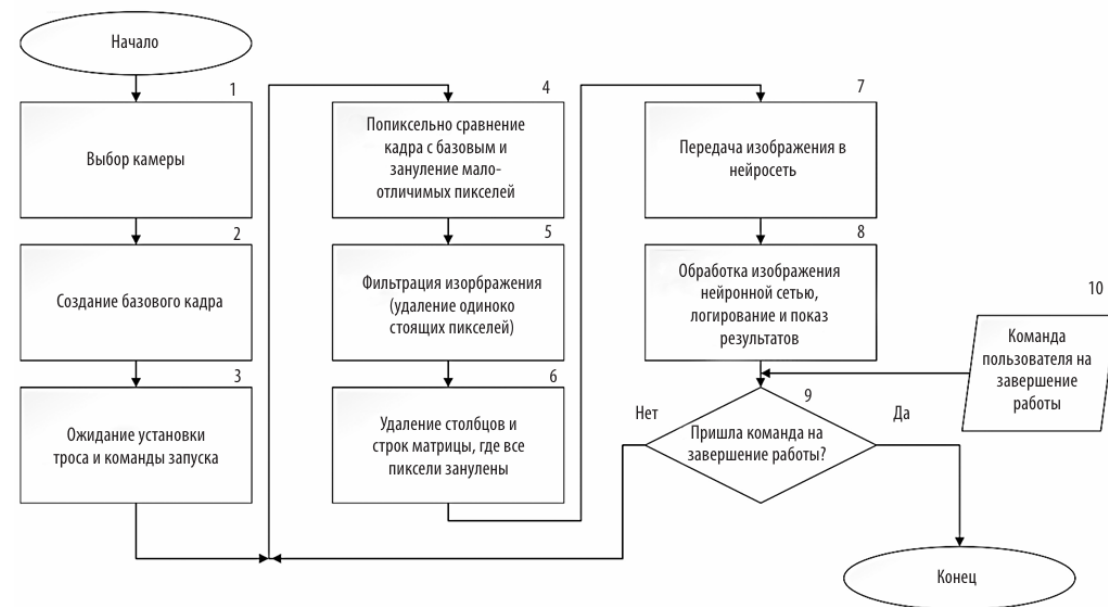


Рисунок 3 – Обнаружение дефекта каната с использованием нейронной сети

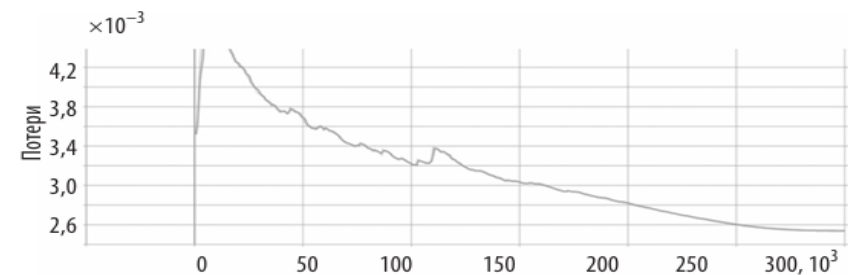


Рисунок 5 – Потери регуляризации при обучении нейронной сети

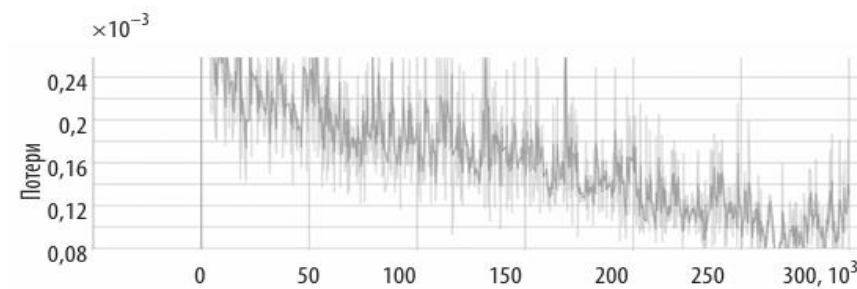


Рисунок 6 – Потери регуляризации при обучении нейронной сети

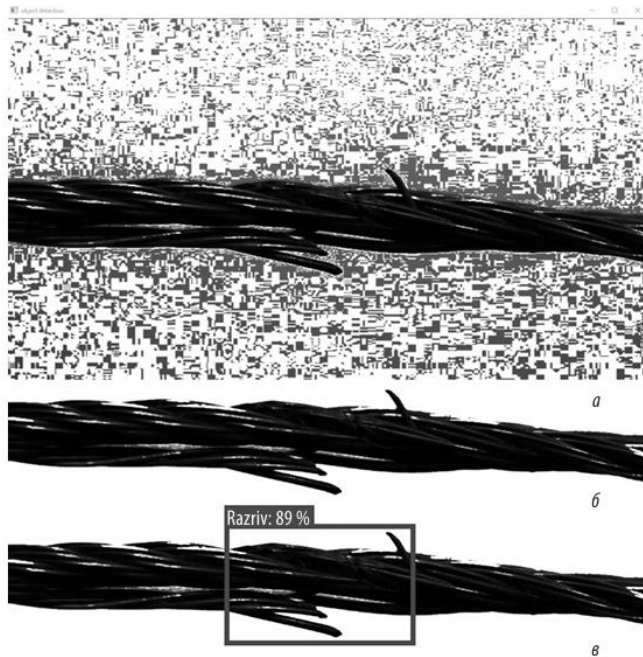


Рисунок 7 – Пример обработки изображений дефектов:
а — вычитание фона; б — фильтрация изображения;
в — распознавание

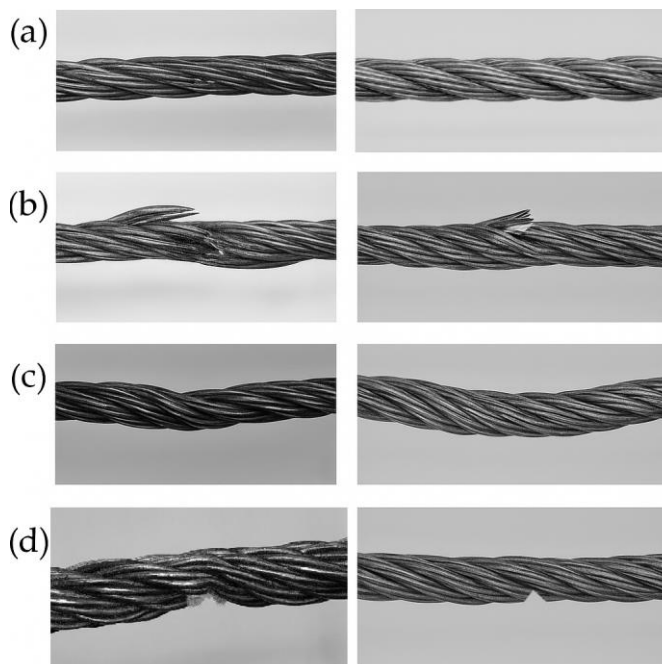


Рисунок 10 – Примеры диагностических категорий, представленных в наборе данных для каждого класса: реальное изображение (слева) и соответствующее синтетическое изображение (справа); (а) отсутствие дефекта; (б) обрыв провода; (с) изгиб; (д) залом

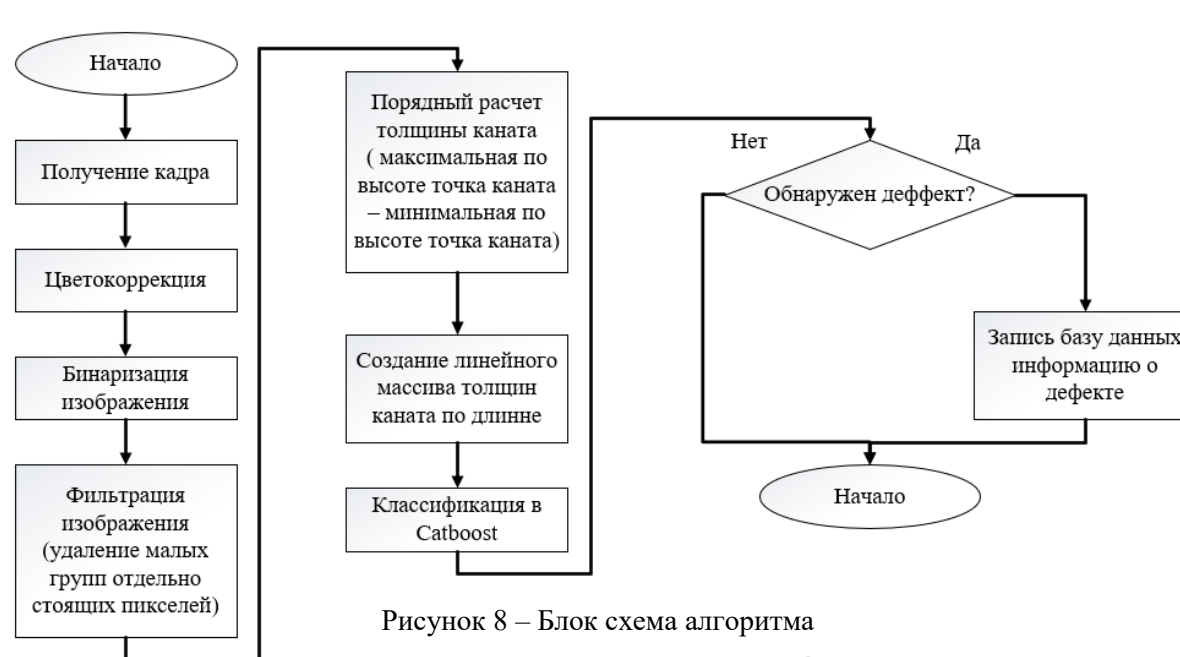


Рисунок 8 – Блок схема алгоритма

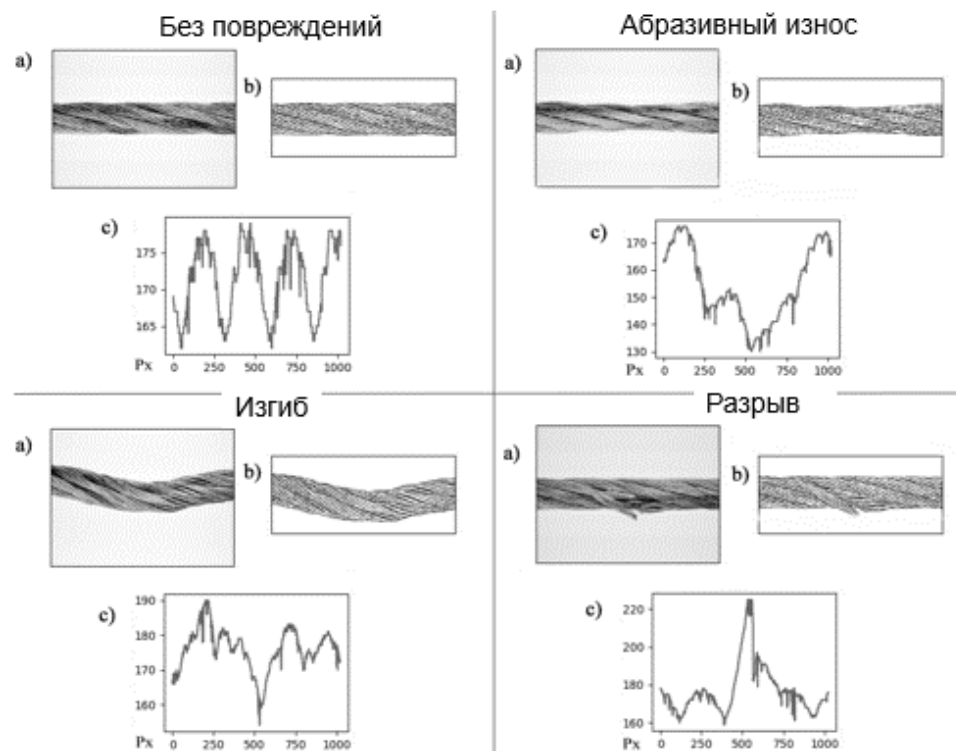


Рисунок 11 – Результаты обработки синтетических изображений каната.
(а) исходное изображение, (б) предварительно обработанное бинарное изображение, (с) извлеченный профиль толщины вдоль длины каната

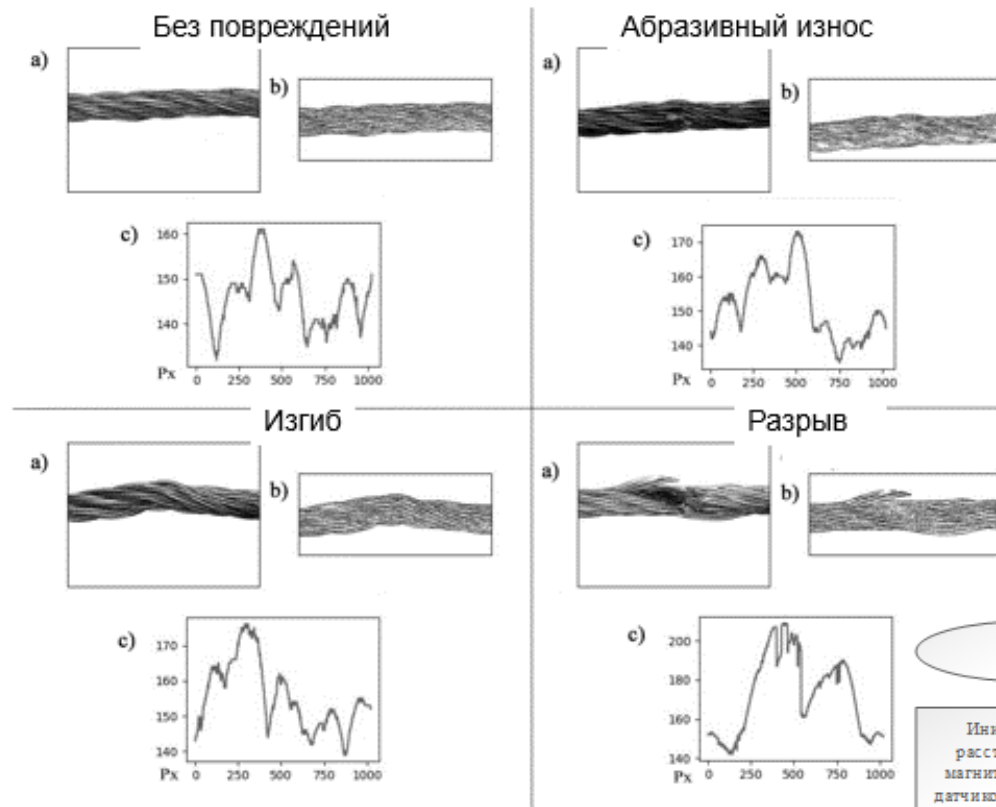


Рисунок 12 – Результаты обработки реальных изображений каната: (а) исходное изображение, (б) предварительно обработанное бинарное изображение, (с) извлеченный профиль толщины вдоль длины каната

Таблица 3 – Показатели эффективности классификации по классам состояния

Тип дефекта	Площадь под кривой рабочей характеристики приемника	F1-результат	Точность	Отзывчивость	Сбалансированная достоверность
Разрыв	0,96	0,92	0,91	0,93	0,93
Абразивный износ	0,94	0,89	0,88	0,89	0,90
Изгиб	0,91	0,86	0,84	0,87	0,88
Без дефекта	0,92	0,87	0,85	0,89	0,88

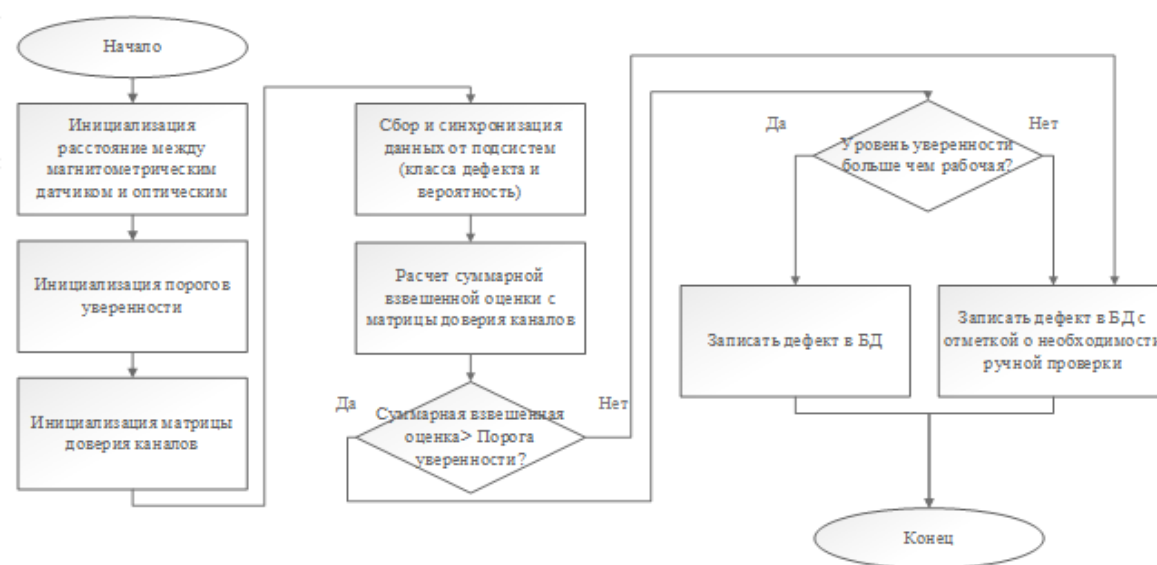


Рисунок 14 - Алгоритм комбинированного метода обнаружения дефектов