На правах рукописи



КОРЧАГИН ВАЛЕРИЙ ДМИТРИЕВИЧ

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ В DICOM-ПОДОБНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Специальность 2.3.1. – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева», г. Москва.

Научный руководитель: **Ковшов Евгений Евгеньевич** доктор технических наук, профессор, начальник научно-инженерного центра цифровых компьютерных систем и автоматизации НИКИМТ АО «НИКИМТ-Атомстрой», г. Москва

Официальные оппоненты: **Никульчев Евгений Витальевич** доктор технических наук, профессор, профессор кафедры КБ-14 «Цифровые технологии обработки данных» ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет», г. Москва

Крысько Николай Владимирович кандидат технических наук, главный научный сотрудник ФГАУ «Научно-учебный центр «Сварка и контроль» при МГТУ им. Н.Э. Баумана», г. Москва

Ведущая организация: ФГАУН «Институт конструкторско-технологической информатики Российской академии наук», г. Москва

Защита состоится 21 сентября 2026 года в 12.00 на заседании диссертационного совета 24.2.375.01 (Д 212.211.01) в Рязанском государственном радиотехническом университете им. В.Ф. Уткина по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Рязанского государственного радиотехнического университета имени В.Ф. Уткина и на сайте диссертационного совета по адресу: https://rsreu.ru/post-graduate/dissertatsii/17645-item-17645.

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

д-р техн. наук А. В. Пруцков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В условиях интенсивного развития технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения наблюдается устойчивая тенденция к интеграции передовых решений производственные, диагностические и инспекционные процессы в рамках концепции Индустрии 4.0 [1-3]. Цифровая трансформация прикладных систем анализа визуальной информации ориентирована на повышение эффективности, качества и безопасности принимаемых решений за счет внедрения интеллектуальных алгоритмов обработки данных. Существенный рост вычислительных возможностей и объемов накапливаемой визуальной информации формирует предпосылки для широкого применения интеллектуальных методов анализа изображений в системах поддержки принятия решений.

В современных информационных системах значительный объем данных представлен изображениями, сопровождаемыми структурированными метаданными, описывающими параметры оборудования, условия получения и характеристики исследуемых объектов. Для стандартизированного хранения и передачи подобных данных применяются форматы семейства DICOM, а также их специализированные расширения — DICONDE и DICOS. Указанные стандарты обеспечивают унифицированное представление визуальной и фактографической информации и позволяют рассматривать DICOM-подобные форматы как универсальные носители гетерогенных данных вне зависимости от предметной области.

Рост объемов информации, представленной в DICOM-подобных форматах, актуализирует задачу автоматизированного поиска схожих изображений, направленного на выявление аналогичных объектов, структурных элементов или аномалий. Применение интеллектуальных моделей и алгоритмов позволяет снизить нагрузку на эксперта, сократить время анализа и повысить объективность и воспроизводимость результатов. Наиболее активно данные технологии используются в медицинской диагностике, где интеллектуальные системы выполняют функции вспомогательного инструмента для поддержки принятия решений для врача-специалиста. Успешный опыт их применения [7-12] подтверждает целесообразность адаптации и развития аналогичных подходов для смежных прикладных областей, включая НК, в которых также используются стандартизированные DICOM-подобные форматы хранения изображений.

Вместе с тем практическая реализация моделей и алгоритмов поиска схожих изображений в условиях реальных данных сталкивается с рядом фундаментальных проблем. Визуальная информация характеризуется вариативностью параметров ее получения, наличием шумов и артефактов, различием модальностей и многоканальной структурой данных. Дополнительную сложность представляет необходимость корректной интерпретации пиксельных значений, физический смысл которых в форматах

DICOM, DICONDE и DICOS определяется в совокупности с фактографическими данными. Использование алгоритмов, основанных исключительно на работе с визуальными признаками или на отдельных классах методов, как правило, не обеспечивает требуемой устойчивости и универсальности результатов поиска в условиях изменяющихся параметров контроля, диагностики и неполноты данных.

В этой связи особую актуальность приобретает задача разработки моделей и алгоритмов комплексированного поиска схожих изображений, предполагающий совместное использование визуальных и фактографических данных в рамках единого формализованного подхода. Комплексирование позволяет компенсировать ограничения отдельных методов, повысить устойчивость и релевантность результатов поиска, а также обеспечить масштабируемость и приемлемое время отклика системы при существенном росте объемов данных. Реализация таких подходов является особенно значимой для прикладных СППР, функционирующих в условиях реального промышленного производства.

Таким образом, актуальность настоящей диссертационной работы обусловлена необходимостью повышения эффективности выполнения поисковых запросов в прикладных СППР на основе разработки и комплексного применения моделей и алгоритмов интеллектуального анализа изображений в визуальных и фактографических датасетах, представленных в форматах семейства DICOM и их специализированных расширениях. Решение поставленной задачи имеет существенное практическое значение для широкого круга прикладных отраслей, использующих стандартизированные форматы хранения изображений, и направлено на формирование инвариантных и масштабируемых подходов к интеллектуальному анализу визуальной информации.

Степень разработанности проблемы. Теоретические и прикладные аспекты анализа визуальных данных рассматриваются в работах отечественных и зарубежных авторов, включая исследования, посвященные применению классических алгоритмов обработки изображений и современных архитектур искусственных нейронных сете (ИНС) (J. Redmon, R.B. Girshick, S. Nagraj, А.В. Пролетарский, Л.Г. Гагарина, Дорогов В.Г., Меньшутина Н. В., Кольцова Э. М., Глебов М. Б., Демидова Л.А., Пылькин А.Н., Белов В.В. и другие). Вместе с тем вопросы реализации алгоритмов поиска изображений в составе интегрированных программно-алгоритмических комплексов, ориентированных на поддержку принятия решений в условиях промышленной эксплуатации, остаются недостаточно проработанными.

Вопросам разработки и применения СППР для промышленной отрасли активно посвящены работы таких исследователей, как Ильясов Б.Г., Куликов Г.Г., Буракова Е.А., Конев К.А., Родионов Д.Г., Денисов Д.Ю., Демидова Л.А., Пруцков А.В. и других. В их работах подчеркивается важность интеграции имитационного моделирования и нейросетевых технологий для создания адаптивных и высокоточных систем, учитывающих специфику

производственных процессов, включая особенности НК сварных соединений металлических конструкций.

Несмотря на значительный объем исследований в области СППР и современных методов и алгоритмов обработки изображений, проводимых как отдельными исследовательскими группами, так и ведущими научно-исследовательскими институтами и университетами Российской Федерации, такими, как МАИ, МГТУ им. Баумана, ИТМО, МИФИ, МФТИ, МИРЭА, НИИ «Фотон» (РГРТУ), ФГУП «ГосНИИАС», а также – компаниями-разработчиками программного обеспечения ООО «ИнТехКонтроль», ООО «Микромаш», ООО «К-СИСТЕМС ГРУПП», большинство из актуальных решений характеризуются узкой специализацией или ограниченной применимостью к широкому спектру задач НК. Данный факт ограничивает возможности выбора оптимальных решений и увеличивает затраты, связанные с приобретением, адаптацией и интеграцией разрозненных программных компонентов в масштабируемой производственной среде. Комплексные решения, обеспечивающие гибкость, модульность и адаптивность в контексте современного процесса неразрушающего контроля (НК), остаются недостаточно изученными в отечественной научной среде.

Выявленные «пробелы» в опубликованных результатах исследований и возрастающая потребность промышленности в цифровизации процессов НК обусловили *актуальность* настоящего диссертационного исследования, определив его цели и задачи.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности и устойчивости выполнения поисковых запросов в прикладной системе поддержки принятия решений на основе разработки модели и алгоритмов интеллектуального анализа изображений в DICOM-подобных данных, обеспечивающих комплексное использование визуальных и фактографических признаков в условиях больших объемов информации и распределенной сетевой архитектуры.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие **научные задачи**:

1. Проведен системный анализ существующих алгоритмов поиска и интеллектуального анализа изображений, включая классические алгоритмы, методы на основе глубокого обучения и подходы к ANN-поиску, а также выявлены ограничения использования исключительно визуальных признаков в DICOM-подобных форматах хранения данных;

2. Разработана формальная модель комплексированного представления изображений, предусматривающая интеграцию визуальных эмбеддингов и токенизированных фактографических метаданных в едином семантическом пространстве признаков;

3. Разработана модифицированная архитектура ИНС «DICONDE-YOLO», обеспечивающая интеграцию метаданных на уровне внутренних представлений и адаптацию к специфике DICOM-подобных форматов хранения данных;

4. Разработан алгоритм комплексированного поиска схожих изображений с использованием ANN-индексации, обеспечивающий масштабируемость и снижение вычислительной сложности при росте объема данных;

5. Реализован программный прототип интеллектуальной СППР, интегрирующий разработанные модель и алгоритм в единое информационное пространство и обеспечивающий промышленную масштабируемость;

6. Проведена экспериментальная и эксплуатационная оценка эффективности предложенных решений в сравнении с базовыми программными архитектурами, основанными исключительно на визуальных признаках.

Объектом исследования диссертационной работы являются многоканальные растровые изображения DICOM-подобного формата, рассматриваемые в контексте обработки результатов радиационного НК.

Предметом исследования диссертационной работы является комплексирование программно-алгоритмических методов, направленных на улучшение процесса поиска схожих изображений в СППР.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих положениях:

1. Разработана модель комплексированного интеллектуального анализа изображений в DICOM-подобных данных, основанная на интеграции визуальных эмбеддингов и токенизированных метаданных в едином признаковом пространстве, что обеспечивает повышение релевантности поиска и устойчивости к внутриклассовой вариативности по сравнению с методами, использующими только визуальные признаки на 33% (*п. 12 — «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.»*);

2. Разработана модифицированная архитектура ИНС «DICONDE-YOLO», отличающаяся механизмом интеграции фактографических данных на уровне внутренних слоев сети и возможностью адаптивной реконфигурации с использованием AutoML-контуров, что обеспечивает повышение показателей mAP на 35%, Recall на 45%, NDCG на 33% и расширяет применимость модели в составе СППР (*п. 9 – «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов.»*);

3. Разработан алгоритм масштабируемого комплексированного поиска схожих изображений с использованием ANN-индексации и двухуровневого механизма хранения и кэширования (векторный индекс + обратный индекс), для которого выполнено математическое обоснование экстраполяции вычислительной сложности при росте объема данных, что обеспечивает снижение времени отклика на 62% и повышение пропускной способности системы на 44% (*п. 12 – «Визуализация, трансформация и анализ информации на основе компьютерных методов обработки информации.»*);

4. Разработана архитектура распределенной интеллектуальной СППР, реализующая интеграцию сервисов обработки изображений, векторного поиска, текстового индексирования и мониторинга, обеспечивающая масштабируемость, воспроизводимость и инвариантность по отношению к

структуре DICOM-подобных данных (*п. 9 – «Разработка проблемно-ориентированных систем управления, принятия решений и оптимизации технических объектов.»*).

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в развитии моделей и методов интеллектуального анализа растровых изображений в DICOM-подобных форматах на основе системного анализа и комплексирования разнородной информации. В работе сформирована модель интеграции визуальных и токенизированных фактографических данных в едином семантическом пространстве признаков, что расширяет теоретические представления о построении гибридных признаковых пространств для задач поиска и ранжирования изображений.

Предложенный подход углубляет теоретические основы построения СППР, ориентированных на обработку больших объемов гетерогенных данных, за счет формализации механизмов комплексирования визуальной и фактографической информации, а также математического обоснования масштабируемого ANN-поиска в условиях роста объема данных. Полученные результаты развивают положения системного анализа применительно к задачам интеллектуального поиска в распределенных информационных средах и формируют основу для построения адаптивных архитектур СППР.

Практическая значимость работы заключается в разработке и внедрении программно-алгоритмического комплекса интеллектуального анализа изображений в DICOM-подобных форматах хранения данных, интегрированных в единое информационное пространство прикладной СППР. Реализованная система обеспечивает комплексированный поиск схожих изображений на основе объединения визуальных и фактографических признаков, что позволяет повысить релевантность выдачи, устойчивость к вариативности данных и скорость обработки запросов в условиях промышленной эксплуатации.

Разработанный программный комплекс автоматизирует процедуру интеллектуального поиска и аналитической интерпретации результатов визуального контроля, снижает влияние субъективных факторов при принятии решений и обеспечивает сокращение времени анализа при одновременном росте пропускной способности системы. Архитектура решения ориентирована на масштабируемую производственную среду и допускает интеграцию в существующие информационные контуры предприятий, использующих DICOM-подобные форматы хранения данных.

Методы исследования. При выполнении диссертационных исследований использовались методы системного анализа, математической статистики, экспертных оценок, компьютерного моделирования, машинного и глубокого обучения, методы векторной индексации и приближенного поиска соседей (ANN).

На защиту выносятся:

1. Модель комплексированного алгоритма интеллектуального поиска схожих изображений в DICOM-подобных данных, основанная на интеграции

визуальных эмбеддингов и токенизированных фактографических метаданных в едином семантическом пространстве признаков;

2. Модифицированная архитектура искусственной нейронной сети (ИНС) «DICONDE-YOLO», обеспечивающая формирование информативных представлений с учетом специфики DICOM-подобных форматов и интеграцию метаданных на уровне внутренних слоев модели;

3. Архитектура распределенной интеллектуальной СППР, реализующая взаимодействие сервисов обработки изображений, векторной индексации, текстового поиска и мониторинга в условиях масштабируемой производственной среды;

4. Программный прототип прикладной СППР, реализующий разработанную модель и алгоритм комплексированного поиска схожих изображений;

5. Результаты вычислительных экспериментов и опытной эксплуатации, подтверждающие повышение показателей качества поиска, устойчивости работы системы и эффективности поддержки принятия решений по сравнению с базовыми решениями, основанными исключительно на визуальных признаках.

Достоверность и обоснованность научных положений, теоретических выводов и рекомендаций обеспечена корректным применением математического аппарата и интеллектуальных методов на основе машинного и глубокого обучения. Достоверность подтверждается результатами вычислительных экспериментов, экспериментальной апробации и практическим применением результатов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научном семинаре «Системный анализ и обработка данных в психологии и образовании» (РАО) (Москва, 2024), XVI Международной научной конференции «Интеллектуальные системы» (INTELS’24) (Москва, 2024), Международной научно-технической конференции молодых ученых «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» (Могилев, 2024), VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Программная инженерия: современные тенденции развития и применения (ПИ-2024)» (Курск, 2024), II Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием «Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании» (Брянск, 2024), VIII Международном научно-техническом форуме «Современные технологии в науке и образовании» (Рязань, 2025), III Межрегиональной научно-практической конференции «Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании» (Брянск, 2025), «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении – FRITME» (Москва, 2025), а также – на научных семинарах Передовой инженерной школы химического инжиниринга и машиностроения РХТУ им. Д.И. Менделеева и расширенных заседаниях секции №8 НТС Научно-исследовательского и конструкторского института монтажной технологии АО «НИКИМТ-Атомстрой» (Москва, 2024-2026).

Соответствие паспорту научной специальности. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с пунктами 9, 12 паспорта специальностей научных работников 2.3.1. – «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика».

Реализация и внедрение результатов работы. Полученные результаты и разработанный программно-алгоритмический комплекс внедрены и используются в Учебно-аттестационном центре АО «НИКИМТ-Атомстрой» при VR симуляции операций контроля качества сварных соединений и основного металла, что подтверждается актом о внедрении результатов работы, а также – в учебном процессе и прикладных исследованиях Передовой инженерной школы химического инжиниринга и машиностроения РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Личный вклад автора. Представленные к защите результаты теоретических и экспериментальных исследований получены лично соискателем или при его непосредственном участии. В частности, соискателем выполнена формализация задачи комплексированного поиска схожих изображений в DICOM-подобных данных с учетом необходимости интеграции визуальной и фактографической информации в рамках единого семантического пространства признаков. Разработана модель комплексированного алгоритма поиска, включающая этапы предобработки, токенизации метаданных, формирования эмбеддингов и ANN-индексации, а также определено место алгоритма в структуре прикладной СППР. Разработана и обоснована модифицированная архитектура ИНС «DICONDE-YOLO», отличающаяся интеграцией токенизированных метаданных на уровне внутренних представлений и адаптацией к специфике DICOM-подобных форматов. Проведено экспериментальное исследование базовых и современных нейросетевых архитектур в задачах детекции и поиска дефектов, выполнен сравнительный анализ с прототипом, основанным исключительно на визуальных признаках. Соискателем спроектирована архитектура распределенного программного прототипа СППР, включая структуру внутреннего и межсетевого взаимодействия компонентов, механизмы векторного поиска, кэширования, балансировки нагрузки и мониторинга. Реализован программный прототип, интегрированный в единое информационное пространство предприятия.

Автором проведены вычислительные эксперименты, выполнена оценка качественных и эксплуатационных характеристик СППР, проанализированы показатели точности, релевантности и масштабируемости, а также обоснована экстраполяция производительности ANN-индекса при росте объема данных. Полученные результаты подтвердили достижение цели исследования и эффективность предложенных моделей и алгоритмов в составе прикладной СППР.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа изложена на 129 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и семи приложений. Список литературы включает в себя 101 источник.

Основное содержание работы

Во введении обоснована актуальность разработки модели и алгоритма комплексированного интеллектуального поиска схожих изображений в прикладных системах поддержки принятия решений (СППР), функционирующих в условиях обработки визуальных и фактографических данных, представленных в форматах семейства DICOM и их специализированных расширениях, включая DICONDE и DICOS. Показана роль цифровой трансформации промышленности и внедрения технологий искусственного интеллекта в повышении эффективности анализа визуальной информации в задачах контроля и диагностики.

Сформулированы цель и задачи исследования, направленные на повышение эффективности выполнения поисковых запросов в прикладных СППР за счет разработки модели комплексированного представления изображений, алгоритмов масштабируемого поиска и модифицированной архитектуры искусственной нейронной сети «DICONDE-YOLO». Определены объект и предмет исследования, отражены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертационной работы проведен системный анализ предметной области интеллектуального поиска схожих изображений в данных, представленных в форматах семейства DICOM и его специализированных расширениях — DICONDE и DICOS. Рассмотрены принципы структурированной организации визуальной и фактографической информации, особенности теговой иерархии и интерпретации пиксельных данных с учетом метаданных. Установлено, что DICOM-подобные изображения представляют собой сочетание растровых данных и структурированных атрибутов, описывающих условия получения изображения, параметры оборудования и характеристики исследуемого объекта. Пиксельные значения без учета метаданных не имеют однозначного физического смысла, что ограничивает применение универсальных алгоритмов обработки изображений и делает необходимым формализованное объединение визуальной и фактографической информации.

Обобщенная структура хранения визуальной и фактографической информации в DICOM-подобных форматах представлена на рисунке 1.

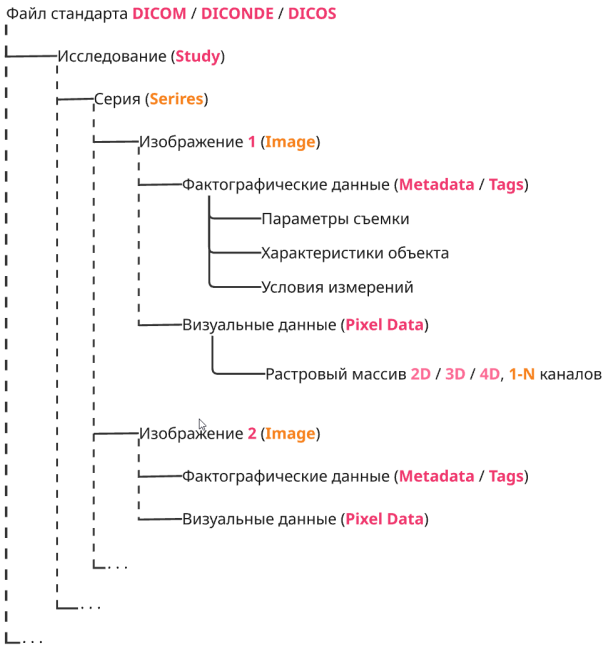

Рис. 1. Обобщенная структура DICOM-подобных форматов

Проведен анализ существующих алгоритмов поиска схожих изображений. Рассмотрены классические методы обработки изображений, архитектуры искусственных нейронных сетей для детекции объектов, включая сверточные сети и архитектуры на основе визуальных трансформеров. Выявлено, что классические алгоритмы, такие как SIFT, LBP и HoG, обеспечивают локальное сопоставление и интерпретируемость признаков, однако обладают слабой масштабируемостью и высокой чувствительностью к шуму. Отмечается, что сверточные сети формируют более выразительные высокоуровневые признаки и устойчивы к частичной окклюзии объектов, но требуют больших обучающих выборок и вычислительных ресурсов. Архитектуры трансформеров обеспечивают учет глобальных зависимостей и точное представление структуры объектов, однако отличаются высокой вычислительной сложностью. Отдельно проанализированы методы нейросетевого хэширования, ориентированные на ускорение поиска в промышленных базах данных.

Результаты анализа показали, что классические алгоритмы обладают ограниченной устойчивостью к вариативности параметров получения данных и плохо масштабируются при росте объема хранимой информации. Нейросетевые подходы обеспечивают более выразительное признаковое представление, однако требуют значительных вычислительных ресурсов и объемных обучающих выборок. Методы хэширования ускоряют поиск, но чувствительны к качеству обучающих данных и параметрической настройке. Установлено, что использование только визуальных либо фактографических признаков не обеспечивает требуемой устойчивости и релевантности результатов в условиях высокой вариативности условий получения изображения и неполноты фактографических данных.

На основании проведенного анализа сформулирован научный вывод о необходимости разработки формальной модели интеграции визуальных и фактографических признаков в рамках единого признакового пространства,

обеспечивающего инвариантность к условиям получения данных и масштабируемость поиска.

Во второй главе разработана формальная модель комплексированного поиска, обеспечивающая совместный учет визуальных и фактографических признаков в едином пространстве представлений. Модель ориентирована на функционирование в рамках промышленной СППР, где принципиально важными являются воспроизводимость результатов, устойчивость к вариативности условий технологических операций НК и масштабируемость при росте объема базы данных.

База данных представлена как множество объектов, каждый из которых описывается парой «визуальный тензор – метаданные». Метаданные характеризуются неоднородной структурой и различными физическими размерностями, что требует их приведения к унифицированному числовому пространству. Для этого введены процедуры токенизации и стандартизации, обеспечивающие интеграцию фактографических данных в архитектуру нейронной сети и формирование итогового эмбеддинга. Схема процедуры представлена на рисунке 2.

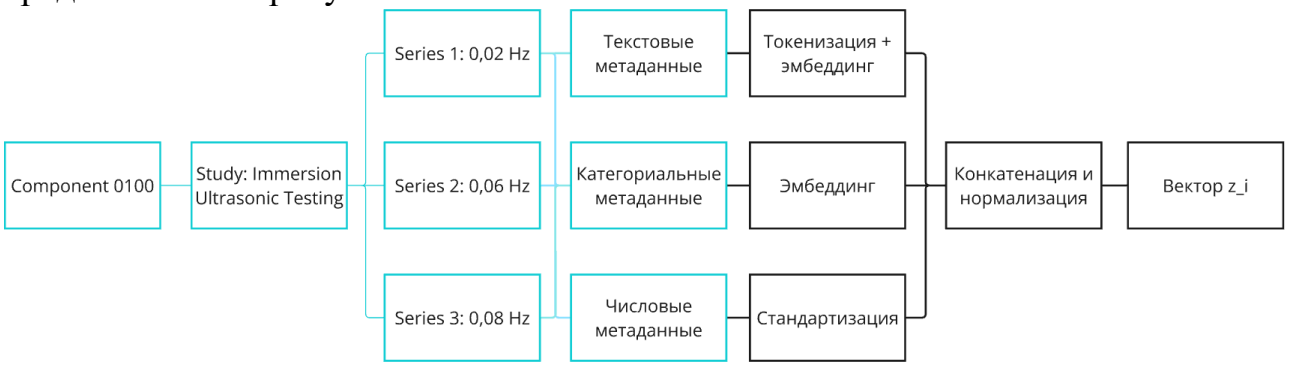

Рис. 2. Схема токенизации метаданных

Задача поиска формализована как задача оптимизации в пространстве комплексированных признаков при ограничении на среднее время отклика системы. В качестве мер сходства применятся косинусная и евклидова метрики. Для сокращения вычислительной сложности введен механизм предварительной фильтрации по фактографическим атрибутам, позволяющий ограничить множество кандидатов до этапа поиска ближайших соседей.

В качестве архитектуры как основы извлечения визуальных признаков предложена модифицированная искусственная нейронная сеть «DICONDE-YOLO», разработанная на базе YOLOv8. В архитектуре сети блок SPPF заменен на ASPP, что позволяет расширить рецептивные поля и повысить точность детекции малых объектов, добавлены блоки глубинной свертки и эффективного канального внимания (ECA). Архитектура модифицированной модели на основе «DICONDE-YOLO» представлена на рисунке 3.

Выбор конфигурации, а также перестроения и дообучения модели ИНС осуществляется в рамках AutoML-подхода, предусматривающего оценку альтернатив по совокупности метрик точности и вычислительной сложности. Для обеспечения промышленной масштабируемости реализовано

горизонтальное распределение нагрузки, поддерживающее балансировку вычислений и соблюдение ограничений по времени отклика.

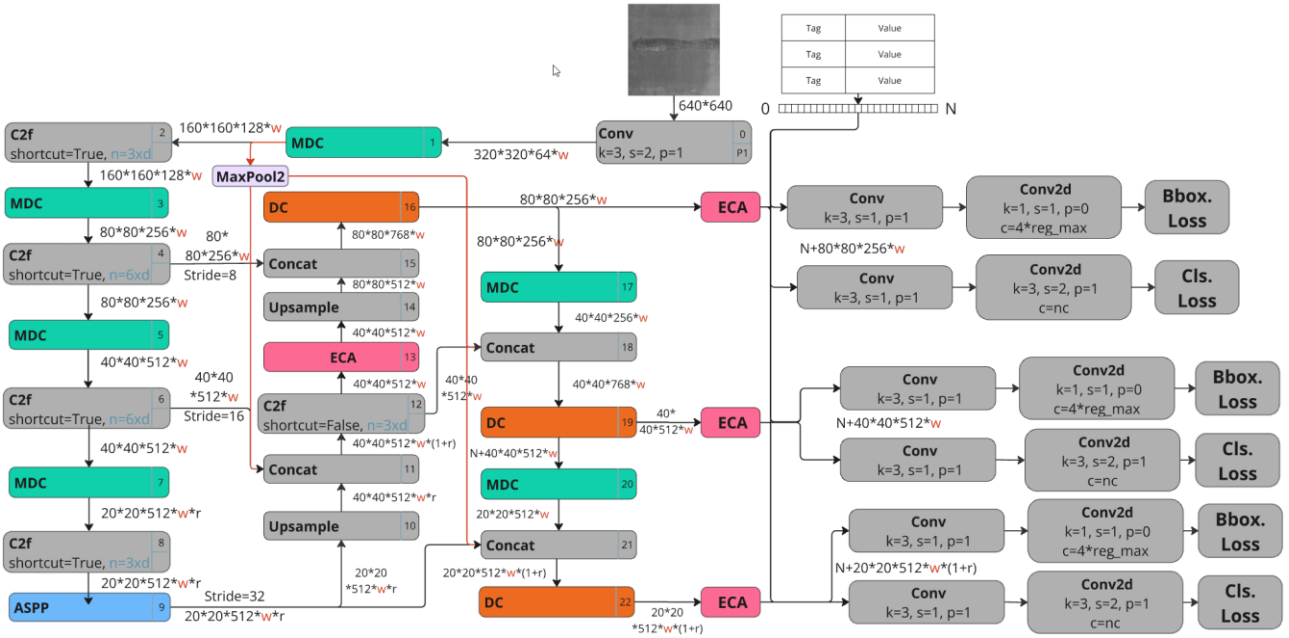

Рис. 3. Архитектура модифицированной модели «DICONDE-YOLO»

Сформирована теоретическая основа комплексированного поиска, объединяющая визуальные и фактографические признаки в едином пространстве представлений и обеспечивающая масштабируемость при промышленной эксплуатации.

В третьей главе представлены результаты экспериментального тестирования разработанной модели и количественной оценки ее эффективности. Эксперименты проводились на фиксированной программно-аппаратной платформе, обеспечивающей воспроизводимость результатов.

Исследования выполнены на специализированных датасетах общим объемом более 160 000 изображений в DICOM-подобных форматах, сопровождаемых структурированными метаданными.

Перед обучением было проведено разделение данных на обучающую, валидационную и тестовую части с исключением пересечений по объектам контроля. Разметка проведена экспертной группой специалистов с двойной валидацией выходных результатов в соответствии с действующими нормативными требованиями. Классификация дефектов и критерии их релевантности определялись в соответствии с действующими нормативными документами и требованиями профильных ГОСТ, регламентирующих процедуры неразрушающего контроля и интерпретацию результатов.

После первичной аннотации проводилась независимая валидация вторым специалистом, включающая проверку корректности локализации дефектов, соответствия классификации нормативным требованиям и согласованности метаданных. В случае расхождений выполнялась процедура согласования с фиксацией итогового решения. Финальная версия разметки включалась в эталонную тестовую выборку и использовалась для расчёта метрик качества

детекции и поиска. Схема процедуры формирования экспертной разметки представлена на рисунке 4.

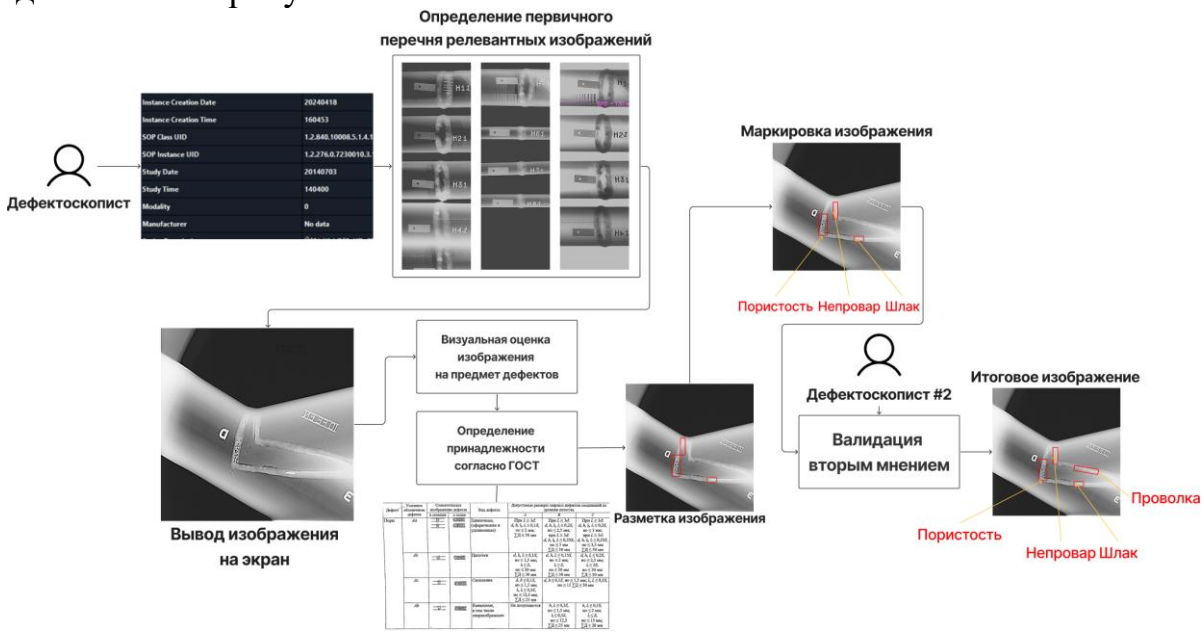

Рис. 4. Схема процедуры экспертной разметки

Проведен сравнительный анализ архитектур YOLOv8–YOLOv12 при идентичных условиях обучения на стандартизированных DICOM-подобных датасетах, включающих более 160 000 изображений с экспертной разметкой. Для каждой архитектуры оценивались ключевые показатели качества детекции, включая Precision, Recall, интегральную метрику mAP50 и CIoU, а также вычислительные характеристики моделей, такие как среднее время инференса и объем потребляемой видеопамяти. Анализ позволил выявить сильные и слабые стороны каждой версии сети ИНС, а также их соответствие требованиям промышленной эксплуатации в условиях интенсивного потока визуальной информации.

Динамика обучения и графики различных показателей потерь представлены на рисунках 5, 6.

Установлено, что YOLOv8 обеспечивает оптимальный баланс между точностью детекции и вычислительными затратами, что делает эту архитектуру наиболее целесообразной для использования в качестве базовой модели при дальнейшей модификации. В ходе экспериментов было выявлено, что YOLOv8 демонстрирует стабильную сходимость при обучении, формирует информативные признаки на различных уровнях сети и при этом сохраняет относительно невысокую нагрузку на вычислительные ресурсы, что особенно важно при интеграции в масштабируемое промышленное приложение.

Сравнительные показатели моделей YOLO на основе метрик mAP и CIoU представлены на рисунке 7.

Дополнительно проведено исследовано влияние размерности эмбеддингов на показатели качества поиска и среднее время отклика системы. Основываясь на полученных результатах, сделан вывод, что размер токенизированных метаданных в 512 элементов обеспечивает рациональный компромисс между качеством поиска и временем отклика, в то время как дальнейшее увеличение

размерности приводит к несущественному приросту точности при существенном росте вычислительной нагрузки. Результаты приведены в таблице 1.

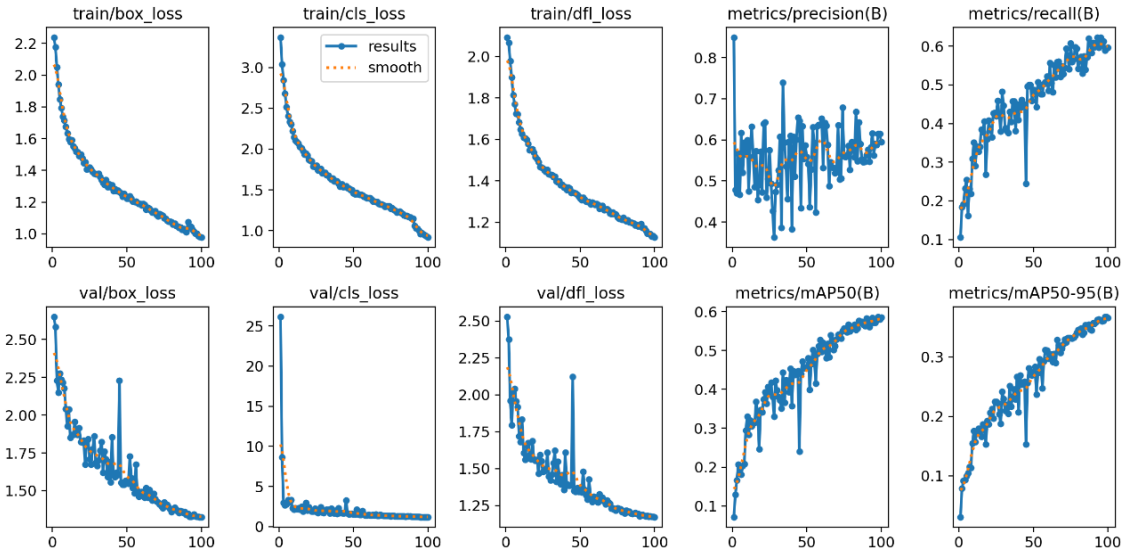

Рис. 52. Динамика обучения модели YOLOv8

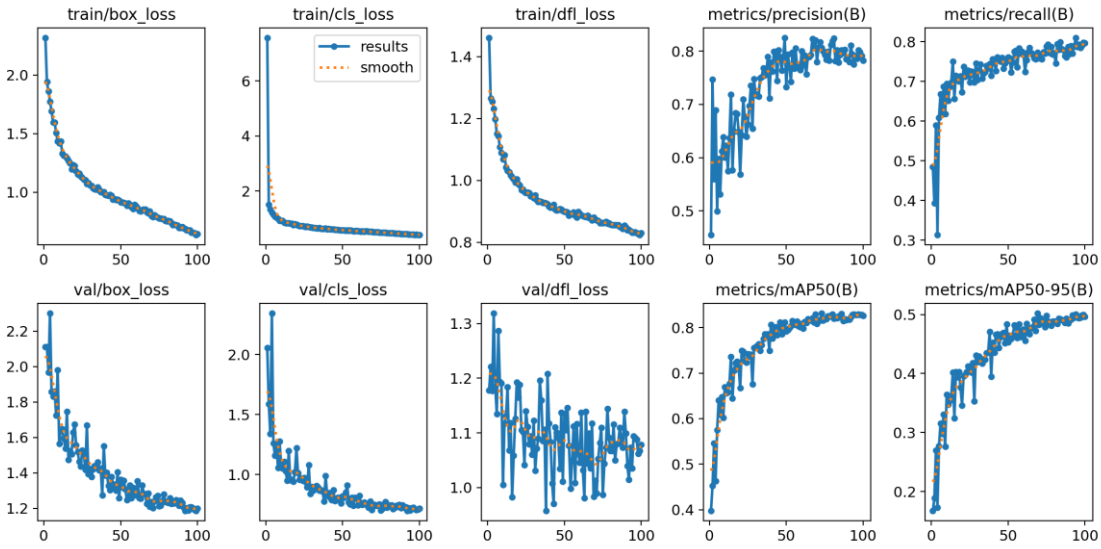

Рис. 63. Динамика обучения модели «DICONDE-YOLO»

Оценка масштабируемости выполнена при увеличении объема базы данных до 10^8 изображений. Полученные результаты продемонстрировали сублинейный рост времени отклика при увеличении объема базы данных, что соответствует свойствам используемого ANN-поиска.

Экспериментальные исследования подтвердили корректность предложенной формальной модели, эффективность архитектурной модификации «DICONDE-YOLO» и практическую применимость комплексированного алгоритма поиска в условиях промышленной эксплуатации.

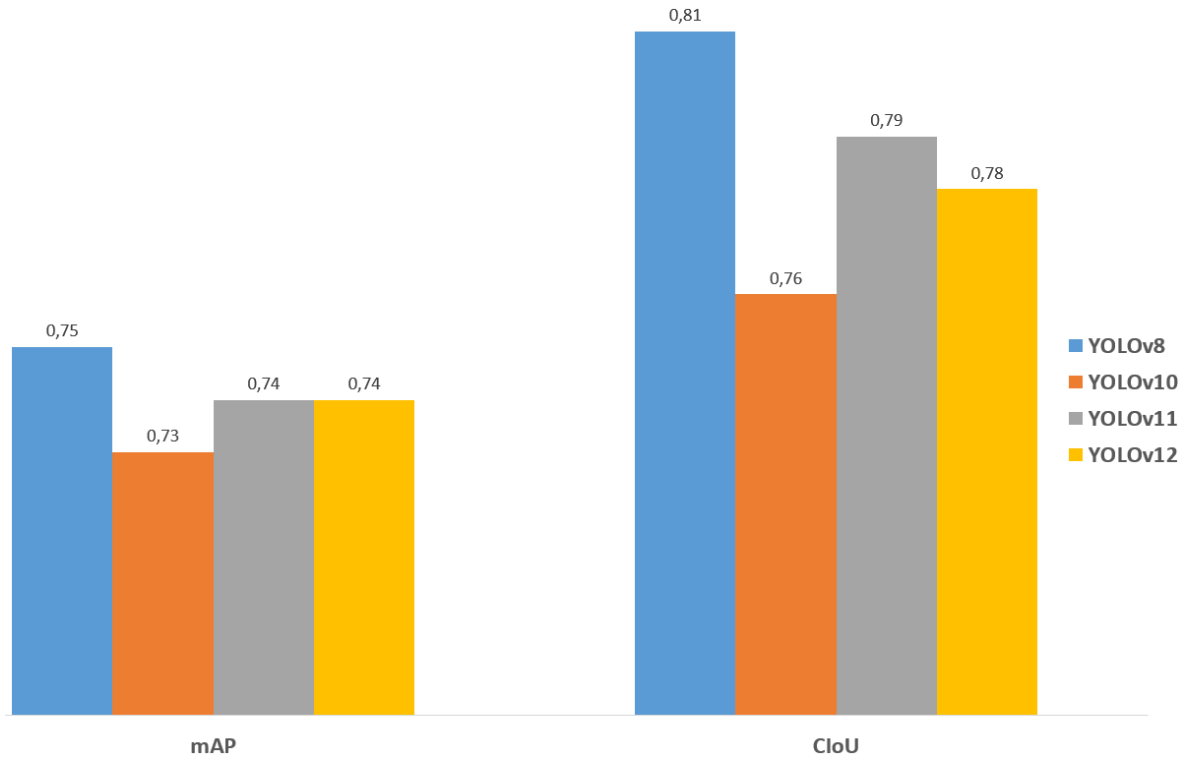

Рис. 7. Сравнение моделей YOLO по метрикам mAP и CIoU

Таблица 1 – Влияние размерности эмбеддингов на качество поиска

Размерность эмбеддинга	**Precision**	**Recall**	**mAP50**	**Среднее время запроса, мс**
128	0.74	0.68	0.61	18
256	0.79	0.73	0.68	24
512	0.83	0.78	0.74	37
1024	0.84	0.79	0.75	65

В четвертой главе представлена практическая реализация разработанной модели «DICONDE-YOLO» и комплексированного алгоритма интеллектуального поиска изображений в составе прикладной системы поддержки принятия решений. Рассмотрены вопросы интеграции алгоритмов в единое информационное пространство СППР, архитектурная организация программного решения и результаты сравнительного анализа с базовой моделью YOLOv8. Архитектурная схема системы с управляющим AutoML-контуром приведена на рисунке 8.

Разработанная система реализована на основе микросервисной архитектуры с разделением вычислительного и пользовательского контуров. В качестве инфраструктурной основы использованы векторное хранилище эмбеддингов, объектное хранилище изображений, система индексирования метаданных, механизм кэширования и балансировщик нагрузки. Взаимодействие сервисов организовано через REST API и gRPC, что обеспечивает масштабируемость и устойчивость при увеличении объёма обрабатываемых данных. Управляющий AutoML-контур реализует адаптивную настройку гиперпараметров, обучение и реконфигурацию модели ИНС на основе мониторинга вычислительных и качественных метрик.

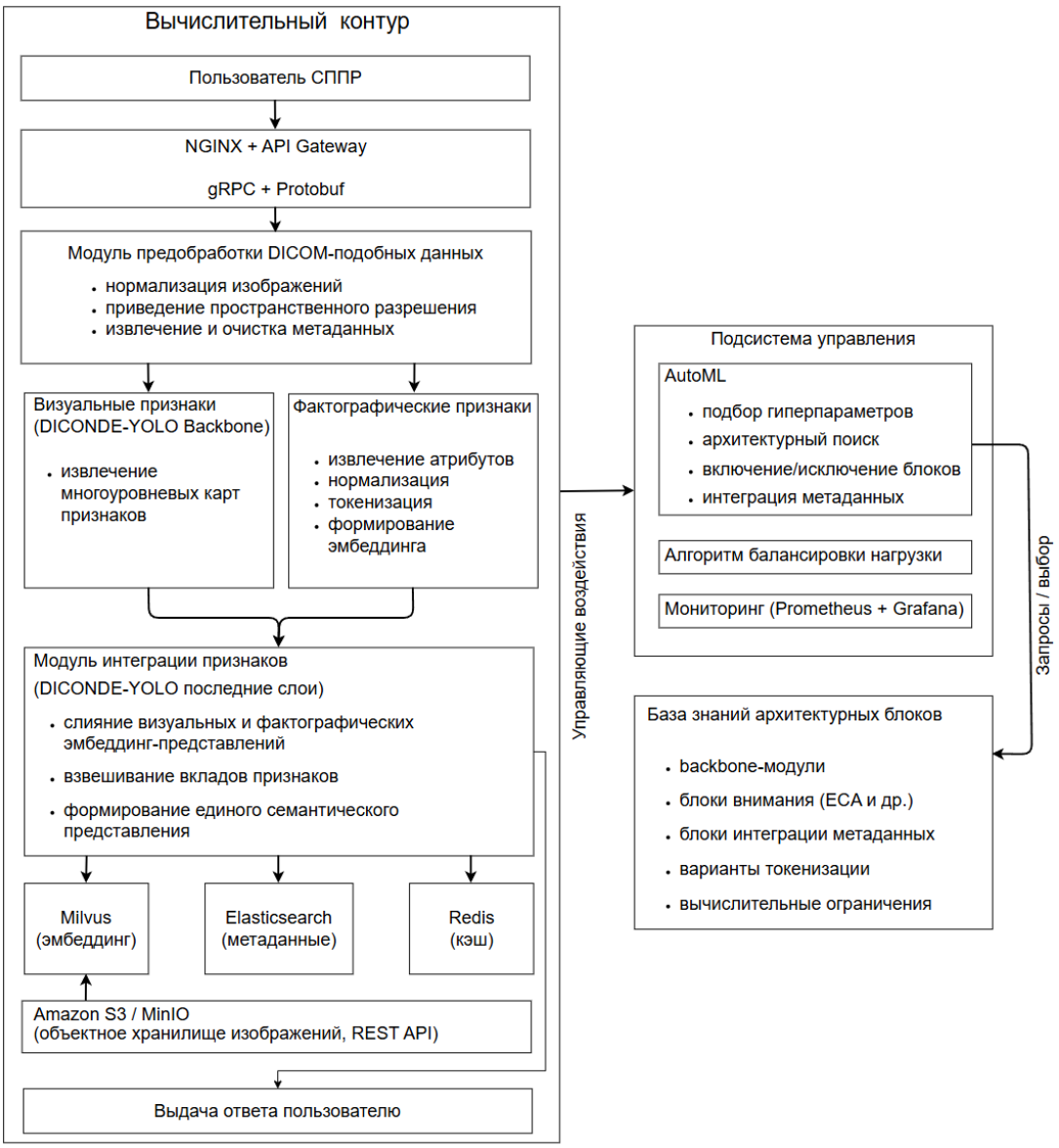

Рис. 84. Архитектура СППР с управляющим AutoML-контуром

Проведен сравнительный анализ разработанной модели «DICONDE-YOLO» и базового решения на основе YOLOv8, количественные результаты которого приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительные данные оценки качества интеллектуального анализа изображений

Модель / алгоритм	**mAP50**	**Precision**	**Recall**	**CIoU**	**NDCG**
YOLOv8	0.67	0.63	0.65	0.58	0.61
Комплексированный алгоритм + «DICONDE-YOLO»	0.94	0.85	0.83	0.84	0.81
Изменение	+40%	+34%	+27%	+44%	+33%

Экспериментальные исследования на массиве из 160 000 DICOM-подобных изображений показали увеличение mAP50 с 0,67 до 0,94, рост Precision с 0,63 до 0,85 и Recall с 0,65 до 0,83, а также повышение показателя NDCG на 33%, что свидетельствует о росте релевантности ранжирования результатов

поиска. Дополнительно зафиксировано снижение среднего времени отклика системы с 65,3 мс до 59,4 мс при одновременном увеличении пропускной способности, что отражено в таблице 3.

Таблица 3 - Эксплуатационные показатели системы интеллектуального анализа изображений

Показатель	**YOLOv8**	**DICONDE-YOLO**
Время инференса, мс	20.18	18.73
Время отлика, мс	65.3	59.4±7.7
Устойчивость при неполных метаданных	Средняя	Высокая
Стабильность результатов	Средняя	Высокая

Среднее время анализа сокращено с 90 до 35 минут, доля ложных тревог снижена с 12% до 5%, а количество обрабатываемых изображений в смену увеличено с 30 до 75 штук. Полученные данные свидетельствуют о повышении эффективности работы специалистов и росте пропускной способности системы при сохранении качества принимаемых решений.

Результаты опытной эксплуатации системы на основе разработанных решений на промышленном предприятии приведены в таблице 4.

Таблица 4. Результаты опытной эксплуатации системы на основе разработанных решений

Показатель	**До внедрения**	**После внедрения**	**Изменение**
Среднее время анализа дефекта	90 мин	35 мин	–61%
Среднее количество ложных обнаружений	12%	5%	-58%
Уровень нагрузки эксперта	4.7 / 5	2.9 / 5	-38%
Количество обработанных изображений в смену	30	75	+150%

Полученные результаты четвертой главы подтверждают достижение цели исследования и практическую применимость разработанной архитектуры и алгоритмов интеллектуального анализа изображений в задачах промышленной поддержки принятия решений.

Основные выводы и результаты работы

1. Решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности выполнения поисковых запросов в СППР за счет разработки модели и комплексного применения визуальных и фактографических признаков, представленных в DICOM-подобных форматах.

2. Разработана архитектура ИНС «DICONDE-YOLO» на основе модификации YOLOv8, отличающаяся интеграцией токенизированных метаданных на уровне внутренних представлений нейронной сети и адаптацией

к специфике DICOM-подобных форматов. Модификация структуры базовой модели позволила повысить дискриминативность эмбеддингов, улучшить показатели локализации и ранжирования и обеспечить устойчивость к вариативности входных данных.

3. Реализована распределенная микросервисная архитектура программного прототипа СППР, включающая алгоритмы векторного поиска, кэширования, балансировки нагрузки, мониторинга и автоматизированной адаптации параметров модели. Прототип интегрирован в единое информационное пространство производственного предприятия и продемонстрировал масштабируемость при росте объема данных в 1000 раз и интенсивности запросов в 100 раз без ухудшения качества поиска.

4. Проведена экспериментальная оценка результатов вычислительных экспериментов и опытной эксплуатации разработанной модели и комплексного алгоритма в составе СППР на промышленном предприятии. В условиях опытной эксплуатации зафиксировано сокращение среднего времени анализа дефекта на 61%, снижение доли ложных тревог и значительное уменьшение нагрузки на эксперта при одновременном росте производительности обработки изображений на 150%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ:

1. **Корчагин, В. Д.** Анализ современных SOTA-архитектур искусственных нейронных сетей для решения задач классификации изображений и детекции объектов / В. Д. Корчагин // Программные системы и вычислительные методы. – 2023. – № 4. – С. 73-87. – DOI 10.7256/2454-0714.2023.4.69306.

2. **Корчагин, В. Д.** Концепция разработки и применения проблемно-ориентированной системы поддержки принятия решений в промышленном производстве / В. Д. Корчагин // Автоматизация. Современные технологии. – 2024. – Т. 78, № 7. – С. 291-296. – DOI 10.36652/0869-4931-2024-78-7-291-296.

3. **Корчагин, В. Д.** Критериальный анализ моделей обработки данных радиационного неразрушающего контроля / В. Д. Корчагин, В. С. Кувшинников, Е. Е. Ковшов // International Journal of Open Information Technologies. – 2024. – Т. 12, № 4. – С. 23-31. – DOI: 10.25559/INJOIT.2307-8162.12.202404.23-31

4. **Корчагин, В. Д.** Синтез технологий виртуальной реальности и компьютерного зрения в симуляторе промышленной радиографии / В. Д. Корчагин, В. С. Кувшинников, Е. Е. Ковшов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. – 2024. – Т. 14, № 4. – С. 98-115. – DOI 10.21869/2223-1536-2024-14-4-98-115.

В изданиях, индексируемых в Scopus/Web of Science:

5. **Korchagin, V.,** Kovshov, E., Kuvshinnikov, V. (2026). Artificial Neural Networks in Non-Destructive Testing and Evaluation: A Novel Approach to Radiographic Inspection. In: Diveev, A., Fomichev, V., Ilin, A., Zelinka, I.,

Sofronova, E. (eds) Intelligent Systems. INTELS 2024. Communications in Computer and Information Science, vol 2603. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-032-04758-8_7

6. Kuvshinnikov V., Kovshov E., **Korchagin V.** Digital Educational Resources in Industrial Radiography //2024 7th International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). – IEEE, 2024. – С. 1-5. – DOI: 10.1109/Inforino60363.2024.10551923

7. Kuvshinnikov V., Kovshov E., **Korchagin V.** 3D Modeling for a Flexible Detector in VR Radiography Simulator //2024 7th International Conference on Information Technologies in Engineering Education (Inforino). – IEEE, 2024. – С. 1-6. – DOI: 10.1109/Inforino60363.2024.10551886

В других изданиях:

8. **Корчагин, В. Д.** Поиск дефектов в сварных металлических соединениях при помощи технологий компьютерного зрения / В. Д. Корчагин // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: Материалы Международной научно-технической конференции молодых ученых, Могилёв, 24–25 октября 2024 года. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2024. – С. 197-198.

9. **Корчагин, В. Д.** DICONDE как инструмент повышения обобщающих способностей в нейросетевом обучении / В. Д. Корчагин // Программная инженерия: современные тенденции развития и применения (ПИ-2024): сборник материалов VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Курск, 17 октября 2024 года. – Курск: ЗАО «Университетская книга», 2024. – С. 171-176.

10. **Корчагин, В. Д.** Automl как практико-ориентированный инструмент адаптации моделей обработки данных неразрушающего контроля / В. Д. Корчагин // Актуальные проблемы современной науки и производства: Материалы IX Всероссийской научно-технической конференции «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина», 27–29 ноября 2024 года. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2024. – С. 230-236.

11. **Корчагин, В. Д.** Разметка DICONDE-изображений для обучения искусственных нейронных сетей / В. Д. Корчагин // Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании: Сборник статей II Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием, Брянск, 14–15 ноября 2024 года. – Брянск: Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, 2025. – С. 104-109.

12. **Корчагин, В. Д.** Качество обучения искусственных нейронных сетей для обработки радиографических изображений / В. Д. Корчагин // Современные технологии в науке и образовании - СТНО-2025: Сборник трудов VIII Международного научно-технического форума. В 10-ти томах, Рязань, 04–06 марта 2025 года. – Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет им. В.Ф. Уткина, 2025. – С. 125-131.

13. Кувшинников В.С., Ковшов Е.Е., Сударев А.В., **Корчагин В.Д.** Практика применения цифровых двойников при симуляции операций контроля в промышленной радиографии / Кувшинников В.С., Ковшов Е.Е., Сударев А.В., Корчагин В.Д. // доклад на IX Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» FRITME-2025, посвященной135-летию со дня рождения проф. Хрущова Михаила Михайловича, Москва, 11 – 13 ноября 2025 г, ИМАШ РАН, 2025, – С. 173-176.
14. Сударев А. В., **Корчагин, В. Д.** Повышение качества обучающих выборок результатов радиационного неразрушающего контроля / А.В. Сударев, В. Д. Корчагин // Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании: Сборник статей III Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием, Брянск, 14 ноября 2025 года. – Брянск: Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, 2026, – С. 137-140.
15. **Корчагин, В. Д.**, Сударев А. В. Модификация нейронной сети для автоматического выявления дефектов сварных соединений на цифровых радиографических изображениях / В. Д. Корчагин // Цифровые, компьютерные и информационные технологии в науке и образовании : Сборник статей II Межрегиональной научно-практической конференции с международным участием, Брянск, 14 ноября 2025 года. – Брянск: Брянский государственный университет им. акад. И.Г. Петровского, 2026, – С. 70-75.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024688377 Российская Федерация. Разметка DICONDE-изображений: № 2024684754: заявл. 15.10.2024: опубл. 27.11.2024 / В. Д. Корчагин, В. С. Кувшинников.

КОРЧАГИН ВАЛЕРИЙ ДМИТРИЕВИЧ

МОДЕЛЬ И АЛГОРИТМЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ В DICOM-ПОДОБНЫХ ДАННЫХ ПРИ ПОДДЕРЖКЕ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Автореферат
Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
Подписано в печать 05.06.2026. Формат 60×84 ⅛
Усл. печ. л. 2,43. Тираж 120 экз.
Рязанский государственный радиотехнический университет.
390005, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1

Отпечатано в оперативной типографии
Акционерного общества
«Научно-исследовательский и конструкторский институт
монтажной технологии – Атомстрой»
127410, г. Москва, Алтуфьевское ш., 43, стр. 2
Сайт: https://ase-ec.ru
Почта: post@atomrus.ru
Тел.: +7(495) 411-65-50