

УДК 330: 004

DOI 10.26118/2782-4586.2026.54.54.070

Данилов Денис Вадимович

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Янучковский Артем Вячеславович

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Вяткин Дмитрий Андреевич

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Технико-экономическая оценка автоматизации контроля техники безопасности на базе открытых нейросетевых архитектур в условиях импортозамещения

Аннотация. В статье рассматривается разработка программно-аппаратного комплекса для непрерывного автоматизированного контроля соблюдения требований охраны труда по данным производственного видеонаблюдения. Предложен каскадный конвейер YOLOv8n[1]→YOLOv8s[1]→LLaVA-1.5[2]→RAG[3,4], обеспечивающий точную детекцию персонала, детальное семантическое описание сцены и автоматическую привязку выявленных нарушений к актуальной нормативной базе. Проведенные эксперименты на 1400 аннотированных изображениях показали для YOLOv8s Precision = 0,961 при скорости около 85 FPS. Для модуля извлечения релевантных нормативов итоговая точность составила 96%. Комплексная экономическая оценка показала высокую рентабельность внедрения предложенной системы: при стоимости оборудования около 1,2 млн рублей окупаемость достигается менее чем за год за счет предотвращения штрафов, снижения страховых выплат и использования механизма возврата средств Социального фонда России (до 30%)[6,7].

Ключевые слова: компьютерное зрение, промышленная безопасность, видеоаналитика, экономическая эффективность охраны труда, импортозамещение, RAG.

Danilov Denis Vadimovich

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Yanuchkovsky Artem Vyacheslavovich

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Viatkin Dmitrii Adreevich

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Techno-economic assessment of automated occupational safety monitoring based on open-source neural network architectures in the context of import substitution

Abstract. This paper discusses the development of a hardware-software complex for continuous automated monitoring of compliance with occupational health and safety requirements based on industrial video surveillance data. A cascade processing pipeline YOLOv8n→YOLOv8s→LLaVA-1.5→RAG is proposed, providing accurate personnel detection, detailed semantic scene description, and automatic mapping of identified violations to the current regulatory framework. Experiments conducted on 1,400 annotated images showed a Precision of 0.961 for YOLOv8s at a speed of approximately 85 FPS. For the relevant regulatory extraction module, the final accuracy reached 96%. A comprehensive economic evaluation demonstrated the high profitability of the proposed system's implementation: with equipment costs around 1.2 million rubles, the payback period is achieved in less than a year due to the prevention of fines, reduction in insurance payouts, and the utilization of the Social Fund of Russia reimbursement mechanism (up to 30%).

Keywords: computer vision, industrial safety, video analytics, economic efficiency of

occupational safety, import substitution, RAG.

Введение

Автоматизация контроля соблюдения правил охраны труда и техники безопасности (ТБ) является критически важным компонентом современных систем управления промышленными предприятиями[9]. Видеонаблюдение охватывает значительную часть производственных зон, однако традиционный контроль часто сводится к ручному просмотру видеопотоков, что плохо масштабируется и приводит к пропуску инцидентов из-за человеческого фактора.

С экономической точки зрения производственный травматизм наносит колоссальный ущерб предприятиям и государству. По данным Социального фонда России (СФР), за 2024 год было зарегистрировано 38,2 тыс. страховых случаев по производственным травмам, а общая сумма выплат пострадавшим превысила 114 млрд рублей[6]. За этот же период произошло почти 6 тысяч несчастных случаев с тяжелыми последствиями[8]. Работодатели несут прямые убытки от оплаты больничных листов, штрафов надзорных органов и простоев оборудования. Этих финансовых и репутационных потерь можно избежать при внедрении предиктивных систем видеоаналитики реального времени.

Наиболее распространённый подход в компьютерном зрении для задач ТБ заключается в детекции объектов СИЗ и проверке их наличия на сотруднике[1]. Тем не менее реальная оценка опасности нередко требует учета контекста и объяснимости: ответственным лицам важны не только бинарные "есть/нет" выводы, но и интерпретируемые отчеты с указанием, какие требования нормативной базы могут быть нарушены. Внедрение подобной системы может значительно снизить количество страховых случаев и уменьшить затраты на лечение сотрудников.

Целью данного исследования является разработка интеллектуальной системы оценки безопасности работ в реальном времени и обоснование экономической рентабельности ее внедрения на производстве.

Материалы. Основным эмпирическим материалом для обучения и тестирования моделей машинного зрения послужил специально подготовленный набор данных, включающий 1400 аннотированных изображений промышленных сцен с детальной разметкой персонала и целевых классов средств индивидуальной защиты (СИЗ). В качестве аппаратно-вычислительной базы для развертывания и тестирования комплекса использовалась доступная платформа, оснащенная процессором Intel Core i7, 64 ГБ оперативной памяти и графическим ускорителем NVIDIA GeForce RTX 3060 с 12 ГБ видеопамати. Выбор подобного оборудования обусловлен строгими экономическими соображениями: использование массовых видеокарт вместо дорогостоящих промышленных серверных кластеров существенно снижает стартовые капитальные затраты (CAPEX) предприятия, делая внедрение системы рентабельным даже для малого и среднего производственного бизнеса.

Программная реализация стенда выполнена на языке Python с использованием фреймворка PyTorch и программно-аппаратной архитектуры CUDA. Информационной и нормативной базой для модуля извлечения знаний послужили актуальные тексты государственных стандартов (ГОСТ) и внутренние инструкции по охране труда. Эти документы были предварительно преобразованы в машиночитаемый текстовый формат и разбиты на логические фрагменты (чанки) для последующей векторизации. Такая материально-техническая база гарантирует независимость разработки от платных зарубежных облачных сервисов, полностью исключая регулярные операционные расходы (OPEX) на лицензии и отвечая национальным целям технологического импортозамещения.[9]

Методы. Методологическая база исследования основывается на применении каскадного алгоритма обработки видеопотока, позволяющего достичь оптимального

баланса между вычислительными затратами и точностью детектирования. Для минимизации требований к объему видеопамати и обеспечения стабильной работы на доступном оборудовании, описанном в материалах, применен метод 4-битной квантизации[5] мультимодальной нейросети LLaVA-1.5-7b[2]. Данный алгоритмический подход надежно удерживает ресурсоемкую модель в рамках ограниченной VRAM, сохраняя высокое качество генерации семантических описаний и делая программное решение экономически рентабельным при масштабировании. В рамках метода визуального контроля тестировались различные архитектуры на подготовленном массиве изображений. Оценка показала, что легковесная модель YOLOv8n способна обрабатывать поток со скоростью до 120 FPS, однако такой подход снижает качество распознавания малоразмерных объектов экипировки. В качестве оптимального метода была утверждена архитектура YOLOv8s[1], которая при скорости инференса порядка 85 FPS продемонстрировала высокие метрики надежности: показатель Precision составил 0,961, mAP50 достиг 0,9612, а интегральная метрика mAP50-95 зафиксировалась на уровне 0,84. С экономической точки зрения такие показатели гарантируют корректную локализацию экипировки для последующей интерпретации, сводя к минимуму ложные срабатывания и предотвращая необоснованные финансовые потери предприятия от остановки производственных линий. Пример детекции элементов СИЗ представлен на иллюстрации (Рис. 1).

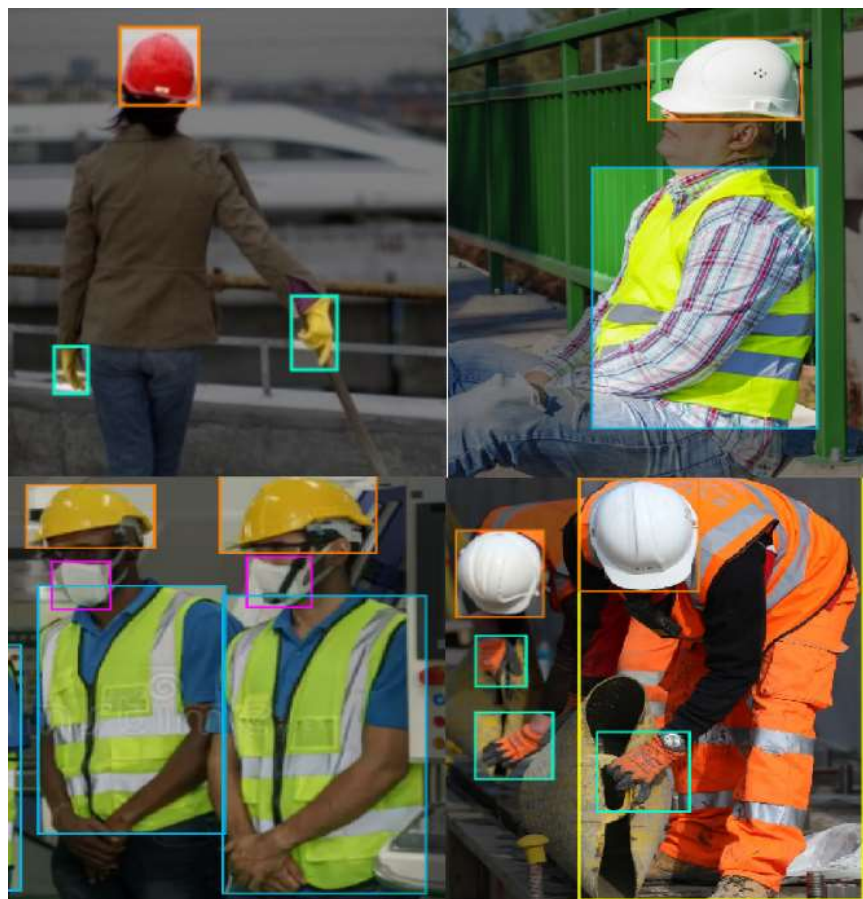


Рис. 1. Визуализация предсказаний модели YOLOv8s

Для автоматизации комплаенс-контроля и снижения нагрузки на инженеров по охране труда применялся метод семантического сопоставления сгенерированных описаний инцидентов с векторизованными текстами нормативных актов[3]. Экспериментально доказано, что использование энкодера paraphrase-multilingual-MiniLM-L12-v2[4] позволяет достичь точности извлечения релевантных нормативов на уровне 96%, что существенно превосходит результаты применения базового метода на основе BERT-base-multilingual[4], показавшего лишь 81%. Метод маршрутизации вычислительной нагрузки реализован по

принципу «мягкого» реального времени: базовые операции детекции и контроля СИЗ выполняются непрерывно, в то время как ресурсозатратные операции семантического описания и извлечения нормативов (retrieval) инициируются исключительно по событию или с заданной периодичностью. Временные характеристики полного аналитического каскада (детекция, описание, поиск в базе и формирование отчёта) составили всего 5–7 секунд на один запрос. Подобный метод распределения задач позволяет параллельно обрабатывать сразу несколько видеопотоков на одном сервере, обеспечивая максимальную утилизацию оборудования и быстрый возврат инвестиций (ROI).

Результат. Таким образом, система может использоваться как инструмент оперативной поддержки инженера по охране труда, формируя объяснимые подсказки и сокращая время ручного поиска нормативов. Тестовое изображение(Рис. 2)



Рис. 2. Тестовый кадр.

В качестве примера на рисунке 2 приведён фрагмент выходных данных мультимодальной модели LLaVA-1.5-7b[2], формируемых по анализируемому кадру. Для объекта №1 система фиксирует потенциально опасное действие (риск выполнения работ) на таймкоде 0 с и формирует текстовое пояснение: рабочий находится на высоте и выполняет работы, связанные со сборкой/монтажом металлических элементов; при этом отмечается наличие каски, сигнального жилета и перчаток как соблюдение базовых мер безопасности. Дополнительно система указывает нормативный документ, наиболее релевантный данной ситуации, - ГОСТ Р 12.3.050–2017[10].

Экономическая эффективность и рентабельность. Макроэкономический анализ производственного травматизма в Российской Федерации демонстрирует колоссальный уровень финансовых потерь как для государственного бюджета, так и для частного сектора. Опираясь на данные отчетности Социального фонда России (СФР) и профильных ведомств за 2024–2025 годы, можно констатировать, что работодатели потратили более 114 миллиардов рублей на страховые выплаты и реабилитацию при несчастных случаях на производстве[6]. Одновременно с этим миллионы человеко-часов рабочего времени ежегодно теряются из-за вынужденных простоев производственных линий и оплаты больничных листов, вызванных несоблюдением базовых правил техники безопасности[8].

Помимо прямых компенсационных выплат, предприятия несут серьезные косвенные убытки, включающие крупные штрафы от Государственной инспекции труда (от 400 тысяч до 1 миллиона рублей за каждый тяжелый инцидент), затраты на найм замещающего персонала и репутационные издержки. Подавляющего большинства этих экономических проблем можно было бы избежать, если бы на предприятиях функционировала система предиктивной оценки безопасности выполнения работ в реальном времени, исключающая влияние человеческого фактора при комплаенс-контроле.

В данном исследовании представлена интеллектуальная видеоаналитическая система, способная в автоматическом режиме анализировать действия персонала, сопоставлять их с законодательными актами и выдавать экспертное заключение с точностью 96%. Для расчета коммерческой привлекательности разработки использовался метод оценки совокупной стоимости владения (TCO) и возврата инвестиций (ROI). Благодаря алгоритмической оптимизации и квантизации моделей[5], минимальный порог входа для внедрения системы крайне низок: капитальные затраты (CAPEX) на базовый аппаратный узел с 64 ГБ оперативной памяти и доступным ускорителем NVIDIA GeForce RTX 3060 (12 ГБ VRAM) составляют порядка 250–300 тысяч рублей. Данная конфигурация оптимальна для развертывания пилотных проектов или контроля локальных производственных участков. Однако при необходимости масштабирования системы на уровень всего предприятия с интеграцией десятков камер для параллельной обработки видеопотоков потребуется закупка более производительного серверного оборудования, например, на базе видеокарт уровня NVIDIA RTX 4090. В сценарии полномасштабного развертывания затраты на один вычислительный узел возрастут до 1–1,2 миллиона рублей. Тем не менее, проведенный финансовый аудит показывает, что внедрение системы делает ее высокорентабельной при любых сценариях масштабирования[9]. Инвестиции в оборудование многократно перекрываются потенциальными убытками, поскольку стоимость устранения последствий даже одного несчастного случая с тяжелым исходом превышает 1,5–2 миллиона рублей. Таким образом, срок окупаемости (Payback Period) предложенного аппаратно-программного комплекса, будь то базовая или масштабированная версия, достигается при предотвращении первого же серьезного инцидента.

Дополнительным фактором, повышающим инвестиционную привлекательность разработки, является возможность использования государственных преференций. Согласно действующим приказам Минтруда России, работодатели имеют законное право направить до 30% сумм страховых взносов на финансирование предупредительных мер по сокращению производственного травматизма[7]. Закупка вычислительных платформ и серверного оборудования для автоматизированного контроля экипировки попадает под данную категорию, что позволяет предприятиям существенно субсидировать капитальные затраты (как на базовые серверы с RTX 3060, так и на промышленные решения с RTX 4090) за счет легального возврата средств из СФР.

Важнейшим аспектом коммерциализации предложенного решения выступает реализация стратегии импортозамещения и обеспечение технологического суверенитета. В условиях санкционных ограничений использование закрытых зарубежных облачных сервисов машинного зрения несет критические риски отключения лицензий и утечки коммерческой тайны. Представленная система базируется на отечественных наработках в области интеграции open-source архитектур и развертывается исключительно на локальных мощностях (on-premise) с возможностью интеграции в инфраструктуру российских операционных систем. Такой подход полностью обнуляет регулярные операционные расходы (OPEX) на оплату зарубежных API, защищает конфиденциальные видеоданные завода от передачи во внешние сети и формирует независимую, экономически устойчивую ИТ-инфраструктуру промышленного предприятия[9].

Заключение. В ходе проведенного междисциплинарного исследования разработан и экономически обоснован программно-аппаратный комплекс для автоматизированного

контроля соблюдения требований охраны труда на базе технологий компьютерного зрения и больших языковых моделей. Предложенный каскадный конвейер, интегрирующий детекторы семейства YOLOv8 и мультимодальную нейросеть LLaVA-1.5 с модулем RAG, доказал свою высокую техническую состоятельность, обеспечивая точность извлечения релевантных нормативных требований на уровне 96% при скорости обработки видеопотока порядка 85 кадров в секунду.

Проведенный финансовый аудит подтвердил исключительную инвестиционную привлекательность разработки: алгоритмическая оптимизация и методы квантизации позволяют развернуть пилотную версию системы на доступном оборудовании потребительского класса (уровня NVIDIA RTX 3060) с минимальными капитальными затратами в пределах 200 тысяч рублей. При необходимости интеграции десятков камер и масштабирования архитектуры на масштабное производство предусмотрен переход на высокопроизводительные серверные решения (уровня NVIDIA RTX 4090), что пропорционально увеличивает пропускную способность комплекса. Независимо от выбранного сценария масштабирования, срок окупаемости (Payback Period) предложенного решения составляет менее одного финансового года. Это достигается за счет того, что предотвращение даже единичного несчастного случая с тяжелым исходом нивелирует потенциальные убытки предприятия в размере 1,5–2 миллионов рублей (включая штрафы, простои и компенсации), а использование легального механизма возврата до 30% страховых взносов из Социального фонда России[7] позволяет дополнительно субсидировать закупку вычислительных мощностей.

Более того, архитектурный упор на использование открытых моделей (open-source) и их строго локальное развертывание (on-premise) обнуляет регулярные операционные расходы (ОРЕХ) на зарубежные облачные сервисы и гарантирует абсолютную защиту корпоративных данных. Таким образом, внедрение разработанной интеллектуальной видеоаналитической системы не только результативно решает задачу снижения производственного травматизма, но и выступает высокорентабельным инструментом цифровой трансформации, обеспечивающим технологический суверенитет и долгосрочную экономическую устойчивость отечественных промышленных предприятий[9].

В настоящее время разработанная система ориентирована на решение узкоспециализированных задач техники безопасности, однако в дальнейшем планируется проведение промышленного тестирования и ее внедрение на реальных производственных объектах. Гибкость модульной RAG-архитектуры позволяет масштабировать комплекс на смежные виды деятельности: от контроля технологических процессов и логистики до аудита качества выпускаемой продукции. Таким образом, внедрение интеллектуальной видеоаналитической системы не только результативно снижает уровень производственного травматизма, но и выступает универсальным, высокорентабельным инструментом цифровой трансформации, обеспечивающим технологический суверенитет отечественных предприятий.

Список источников

1. Ultralytics. Explore Ultralytics YOLOv8 [Электронный ресурс]. – URL: <https://docs.ultralytics.com/models/yolov8/> (дата обращения: 10.02.2026).
2. Improved baselines with visual instruction tuning / H. Liu, C. Li, Q. Wu, Y. J. Lee // arXiv preprint arXiv:2310.03744. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/pdf/2310.03744.pdf> (дата обращения: 10.02.2026).
3. The Faiss library / M. Douze, A. Guzhva, C. Deng [et al.] // arXiv preprint arXiv:2401.08281. – 2024. – URL: <https://arxiv.org/abs/2401.08281> (дата обращения: 10.02.2026).
4. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-networks // arXiv preprint arXiv:1908.10084. – 2019. – URL: <https://arxiv.org/abs/1908.10084> (дата обращения: 10.02.2026).

5. 8-bit optimizers via block-wise quantization / T. Dettmers, M. Lewis, Y. Belkada, L. Zettlemoyer // arXiv preprint. – 2022. – URL: <https://arxiv.org/abs/2110.02861> (дата обращения: 10.02.2026).

6. Официальные статистические данные по обязательному социальному страхованию от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний [Электронный ресурс] // Социальный фонд России: официальный сайт. – URL: <https://sfr.gov.ru/> (дата обращения: 02.03.2026).

7. Об утверждении Правил финансового обеспечения предупредительных мер по сокращению производственного травматизма: приказ Минтруда России от 14.07.2021 № 467н (ред. от 27.02.2023) // Собрание законодательства РФ. – 2021.

8. Экономические последствия производственного травматизма в России: оценка потерь и пути снижения / А. И. Иванов, В. С. Петров // Охрана труда и промышленная безопасность. – 2025. – № 4. – С. 15–22.

9. Внедрение систем видеоаналитики на промышленных предприятиях: оценка рентабельности и технологического суверенитета / Е. Н. Смирнова // Цифровая экономика и инновации. – 2024. – Т. 5, № 2. – С. 44–51.

10. ГОСТ Р 12.3.050-2017. Система стандартов безопасности труда. Строительство. Работы на высоте. Правила безопасности. – Введ. 2018-03-01. – М.: Стандартинформ, 2017. – 28 с.

Сведения об авторах

Данилов Денис Вадимович, студент-бакалавр кафедры АРиУТС, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия,
Янучковский Артем Вячеславович, студент-бакалавр кафедры АРиУТС, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия,
Вяткин Дмитрий Андреевич, к.т.н., доцент, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия

Information about the authors

Danilov Denis Vadimovich, Bachelor's student of the Department of the Russian Academy of Sciences, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia

Yanuchkovsky Artyom Vyacheslavovich, Bachelor's student of the Department of ARiUTS, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia,

Vyatkin Dmitry Andreevich, PhD, Associate Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russia