

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЕННЫМ ЦИКЛОМ ОБЪЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА

LIFE CYCLE MANAGEMENT OF CONSTRUCTION FACILITIES



УДК 69.059

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-27-36>

Критический анализ использования технологии анализа цифровых изображений при мониторинге строительных конструкций и материалов

Л.С. Сабитов , Л. Али 

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва,
Российская Федерация

✉ sabitovLS@mgsu.ru



EDN: HCOBUQ

Аннотация

Введение. В связи с недавним широким внедрением передовых технологий в строительном секторе и неотложной необходимостью завершать проекты в кратчайшие сроки и с минимальными затратами принцип достижения высокого уровня качества при реализации проектов представляет собой сложную задачу для тех, кто работает в области строительства. В этих условиях технология цифрового анализа изображений стала перспективным решением для обеспечения требований по повышению эффективности управления проектами на различных этапах их жизненного цикла. В данном обзоре литературы анализируется роль технологий цифровой обработки изображений в мониторинге строительных материалов и конструкций на протяжении всего жизненного цикла проекта с целью повышения качества и эффективности. Исследование направлено на оценку эффективности этой технологии по сравнению с традиционными методами, обзор последних разработок в области применения цифровой обработки изображений для мониторинга строительных конструкций и определение показателей эффективности, таких как время и стоимость, а также упоминание препятствий, мешающих ее широкому внедрению в инженерной практике.

Материалы и методы. Проведён системный обзор более 30 публикаций (2015–2024 гг.), охватывающих алгоритмы ИИ (CNN, YOLOv4), 3D-моделирование (LiDAR, Structure from Motion) и интеграцию BIM. Оценены их применимость, масштабируемость и влияние на мониторинг состояния конструкций.

Результаты исследования. Полученные результаты показали, что использование технологии цифрового анализа изображений как инструмента для мониторинга конструкций и контроля качества строительных материалов на разных этапах жизненного цикла проекта привело к повышению качества проектов, сокращению времени и затрат, а также улучшению процесса принятия решений на разных стадиях проектного цикла. Интеграция обработки изображений с искусственным интеллектом и системами информационного моделирования зданий обеспечила точность в обнаружении дефектов в зданиях и строительных материалах, повысив эффективность управления проектами на 25 %.

Обсуждение и заключение. ЦОИ демонстрирует трансформационный потенциал, но сталкивается с барьерами: влияние внешней среды, гетерогенность данных и отсутствие стандартизации. Предложены интеграция LiDAR, разработка устойчивых моделей машинного обучения для анализа мультимодальных данных и усиление междисциплинарного взаимодействия. Для преодоления ограничений требуются дальнейшие исследования, направленные на оптимизацию технологий под реальные условия эксплуатации. ЦОИ революционизирует мониторинг конструкций, однако массовое внедрение возможно лишь через устойчивые инновации, партнёрство между отраслями и адаптацию к внешним факторам.

Ключевые слова: анализ цифрового изображения, жизненный цикл проекта, контроль качества, мониторинг

Для цитирования. Сабитов Л.С., Али Л. Критический анализ использования технологии анализа цифровых изображений при мониторинге строительных конструкций и материалов. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2025;4(4):27–36. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-27-36>

Critical Analysis of the Use of Digital Image Analysis Technology to Monitor Construction Facilities and Materials

Linar S. Sabitov  , Lin Ali 

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

 sabitovLS@mgsu.ru

Abstract

Introduction. Due to the latest wide-scale adoption of advanced technologies in the construction sector and the pressure to complete projects in the shortest time and at minimal cost, the principle of achieving a high-quality level in project implementation is a daunting task for those working in construction. In this context digital image analysis technology has served as a viable solution to meet the requirements for improving project management efficiency at different stages. This literature review examines the role of digital image processing technologies in monitoring construction materials and structures throughout the project lifecycle in order to improve their quality and efficiency. The aim of the study is to evaluate the efficiency of this technology compared to traditional methods, review the latest developments in digital image processing for monitoring building structures, and identify performance indicators such as time and cost, as well as mention obstacles preventing its wide-scale adoption in engineering.

Materials and Methods. More than 30 publications (2015–2024) covering AI algorithms (CNN, YOLOv4), 3D modeling (LiDAR, Structure from Motion) and BIM integration were systematically reviewed. Their applicability, scalability, and impact on structural condition monitoring were evaluated.

Research Results. According to the results, the use of digital image analysis technology as a tool for monitoring structures and quality control of construction materials at different stages of a project lifecycle caused improved project quality, reduced time and costs, and boosted decision-making at different stages of a project cycle. The integration of image processing with artificial intelligence and building information modeling systems proved to be accurate in detecting defects in buildings and building materials with a 25% increase in the project management efficiency.

Discussion and Conclusion. Digital image processing (DIP) holds a transformational potential, but it is facing some obstacles such as environmental influences, data heterogeneity and lack of standardization. LiDAR integration, development of sustainable machine learning models for multimodal data analysis, and strengthening interdisciplinary collaboration are set forth. In order to overcome the restraints, further research is required to optimize technologies for real-world operating conditions. DIP is revolutionizing design monitoring, but mass adoption is possible only by means of sustainable innovation, industry-wide partnerships, and adaptation to external factors.

Keywords: digital image analysis, project lifecycle, quality control, monitoring

For citation. Sabitov LS, Ali L. Critical Analysis of the Use of Digital Image Analysis Technology to Monitor Construction Facilities and Materials. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2025;4(4):27–36. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2025-4-4-27-36>

Введение. В связи с быстрым развитием сектора строительного проектирования контроль качества материалов и инфраструктуры является ключевой задачей для инженеров и проектировщиков. На протяжении десятилетий отрасль полагалась на традиционные методы, такие как ручной визуальный осмотр или ручные измерения, которые, как показали исследования, подвержены человеческой ошибке до (30–40 %), особенно в зонах повышенного риска или в труднодоступных местах. Эти методы часто не позволяют своевременно выявить ранние признаки деградации, такие как выцветание или отслоение защитного покрытия, которые могут сигнализировать о начале коррозионных процессов или проникновении влаги в конструкцию. В сочетании с микротрещинами такие дефекты способны со временем привести к снижению несущей способности элементов и, как следствие, угрожать безопасности объекта [1].

В отличие от них методы цифровой обработки изображений стали перспективным решением для повышения точности наблюдения и снижения затрат. В исследовании [2] комбинация алгоритма Otsu и сети YOLOv4 позволила классифицировать трещины в бетоне с точностью 99,75 %, при этом помехи из-за поверхностных включений снизились на 40 %. Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с тепловизионными системами показало возможность обследования армированных конструкций в рекордные сроки, сократив период обследования на 30 % по сравнению с традиционными методами [3].

Впрочем, эти методы по-прежнему сталкиваются с препятствиями, связанными с условиями окружающей среды и эксплуатации. Согласно исследованиям [4], при слабом освещении или случайных вибрациях точность обнаружения снижается до 75 %, что подчеркивает необходимость разработки алгоритмов, устойчивых к шумам.

С другой стороны, в работе [5] подчеркивается сложность анализа асфальтовых смесей с помощью двумерных изображений, что побудило авторов разработать индекс IPAR с помощью алгоритма цветовой сегментации для повышения точности оценки распределения заполнителей. Более того, интеграция компьютерного зрения и методов BIM является ключевым фактором повышения эффективности. В статье [6] интеграция данных LiDAR с BIM-моделями обеспечила сравнение геометрического проекта с реальной структурой с пространственной четкостью ± 2 мм, что улучшило проактивное обслуживание. Цифровая корреляция изображений (DIC) доказала свою эффективность в измерении динамических деформаций мостов под действием нагрузок, где чувствительность измерений достигает 0,1 мм, превосходя ручные методы, которые не превышают 0,5 мм [7].

Несмотря на эти достижения, результаты исследования [8] демонстрируют, что эффективность систем мониторинга в значительной степени зависит от качества входных данных, особенно при применении спектральной визуализации и электромагнитного обнаружения для выявления рисков коррозии арматурной стали и свойств бетонного покрытия, что позволило достичь 90 % точности при объединении с лабораторными данными. Исследователи в работах [9, 10] также обсуждают необходимость разработки моделей машинного обучения, способных обрабатывать разнородные данные, например, объединять изображения LiDAR с тепловизионными изображениями, для повышения надежности проектов на открытом воздухе.

Целью данного исследования является обзор последних достижений в области применения цифровой обработки изображений для структурного мониторинга, акцентируя следующее:

1. Инновационные технологические подходы.
2. Интеграция между системами, например: интеграция БПЛА с BIM для повышения эффективности инспекции.
3. Практические проблемы, например: влияние плохого освещения или вибраций на точность результатов.

Проанализировав более 30 исследований, опубликованных в период с 2015 по 2024 год, в данной статье будет дано комплексное представление о роли этих технологий в достижении устойчивости и снижении затрат для повышения эффективности управления проектами. а также предложены решения для устранения ограничений, препятствующих применению этих технологий в будущих проектах.

Материалы и методы. В ходе исследования рассмотрены технологии цифровой обработки изображений в области мониторинга зданий и строительных материалов.

1. Технология цифровой обработки изображений в области мониторинга зданий:

Методы цифровой обработки изображений становятся основой для разработки систем мониторинга сооружений, обеспечивая точные и безопасные решения для раннего обнаружения повреждений. В [11] разработана интегрированная система, основанная на объединении разработанного алгоритма Otsu с морфологическими фильтрами (рис. 1), такими как медианный фильтр и гауссовый фильтр, для выделения трещин в железобетоне, где точность обнаружения достигла 98,75 % при классификации типов повреждений (поверхностные, капиллярные, продольные/поперечные трещины) [12], при этом уменьшив влияние помех, вызванных загрязнениями, на 40 %. В исследовании [2] для повышения скорости классификации также использовалась сеть YOLOv4, основанная на работе искусственного интеллекта, позволяющая исследовать 120 участков изображения в секунду. Для сравнения, ручное исследование занимает несколько минут для каждого участка.

При проведении полевых наблюдений беспилотные летательные аппараты доказали свою полезность для доступа в опасные или труднодоступные районы. В исследовании [1] БПЛА, оснащенные камерами высокого разрешения, использовали механизм обработки изображений (эвристическая обработка), основанный на сочетании нескольких типов алгоритмов (преобразование Шляпы, пороговая обработка HSV, пороговая обработка градаций серого) для обследования железобетонных конструкций и обнаружения трещин и разрушения поверхности в проекте университетского городка, и подтвердили качественное улучшение производительности предложенных алгоритмов по сравнению с традиционными методами. При этом основное внимание уделялось минимизации ошибок (таких как путаница трещин с другими краями) и повышению четкости результатов обнаружения, так как было замечено, что представленный в работе алгоритм дает на 35 % более точные результаты, чем традиционные алгоритмы, в то время как в работе [3] представлен более продвинутый механизм идентификации состояния объекта, основанный на алгоритмах (Canny & Prewitt Edge Detectors) для идентификации трещин, алгоритме (Color Thresholding) для обнаружения присутствия любых живых организмов на поверхности бетона и обнаружения состояния арматуры (рис. 1). Представленная методология была применена к телекоммуникационной башне из бетона высотой 177 метров в Португалии. По результатам исследования система смогла обнаружить коррозию и трещины в бетоне с точностью 92 %, а также обнаружить биоутечки и коррозию арматуры с точностью 90 %, сократив при этом время, необходимое для осмотра, на 30 % по сравнению с традиционными методами, использующими строительные леса и ручные инструменты [3]. Результаты применения технологии обработки цифровых изображений, снятых дронами, и их обработки с помощью алгоритмов (Rich Feature Hierarchies) и (Fast R-CNN) для обнаружения поверхностных повреждений водопропускных

сооружений и мостов (трещин и коррозии), а также использования методов (t-SNE) для уменьшения размеров и визуализации сложных данных, дали точность обнаружения поверхностных трещин до 95 % при сокращении времени, необходимого для осмотра, на 70 % по сравнению с традиционными ручными методами, что привело к повышению точности и эффективности осмотра и мониторинга объектов при снижении рисков для людей [7].

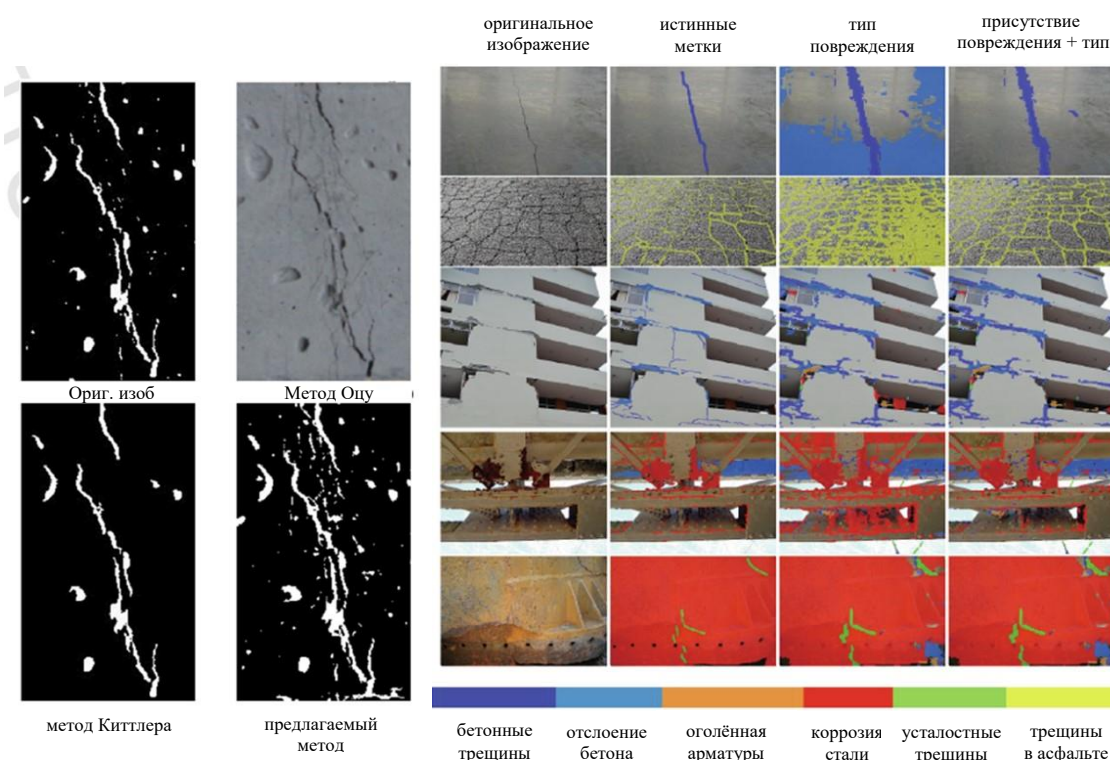


Рис. 1. Анализ цифрового изображения для мониторинга трещин в бетонных элементах [2, 7]

Методы и алгоритмы, основанные на применении фрактального анализа к цифровым изображениям, также применялись для выявления изменений в дефектах бетонных мостов (трещины) путем вычисления фрактальной размерности с помощью алгоритма подсчета коробок [13]. Все эти способы основаны на методах выявления дефектов и мониторинга конструкций с помощью изображений. Кроме того, метод корреляции цифровых изображений (DIC) в исследовании [13, 7] показал превосходную способность измерять деформации моста при динамических нагрузках, зафиксировав чувствительность 0,1 мм на мосту, подвергшемся многократным вибрациям. Данные (DIC) были объединены с результатами конечно-элементного моделирования (FEM), которые подтвердили 95 %-ное согласие результатов, что свидетельствует о возможности их использования для оценки целостности конструкции в режиме реального времени (рис. 2).

В контексте объединения технологий интеграция 3D LiDAR-сканирования и цифровой обработки изображений с BIM (Building Information Modeling) существенно повысила точность и гибкость мониторинга объектов на протяжении всего их жизненного цикла. На этапе проектирования проведено исследование [14], показавшее эффективность лазерного сканирования для создания точных 3D-моделей исторических сооружений, таких как церковь Санта-Марина в Испании, где данные были собраны с помощью цифровой однообъективной зеркальной камеры для получения многоспектральных изображений церковной структуры, а затем объединены с данными 3D-лазерного сканирования для создания точной цифровой модели церковной структуры. Затем изображения были преобразованы в два этапа: во-первых, сегментация по цветовым и текстурным характеристикам, во-вторых, классификация с применением объективной методики классификации для определения материала (биокарентинский известняк) и типов разрушения (трещины, биокоррозия, высаливание). Полученные данные были проанализированы, затем модель была объединена с предварительно обработанными изображениями, и с помощью лазерного сканера были созданы метрические карты для определения мест повреждений на камне с более высокой точностью, чем традиционные методы. Точность обнаружения трещин составила 100 %, а точность обнаружения засоления — 80 % с детальными измерениями допусков поверхности ± 3 мм. Интеграция (LiDAR и BIM) позволила улучшить оценку качества материала и планирование реставрации, а также сократить расходы на 20 % за счет интеграции (ReCap Pro и AutoCAD) для преобразования 3D-модели в подробные чертежи реставрации (рис. 3).

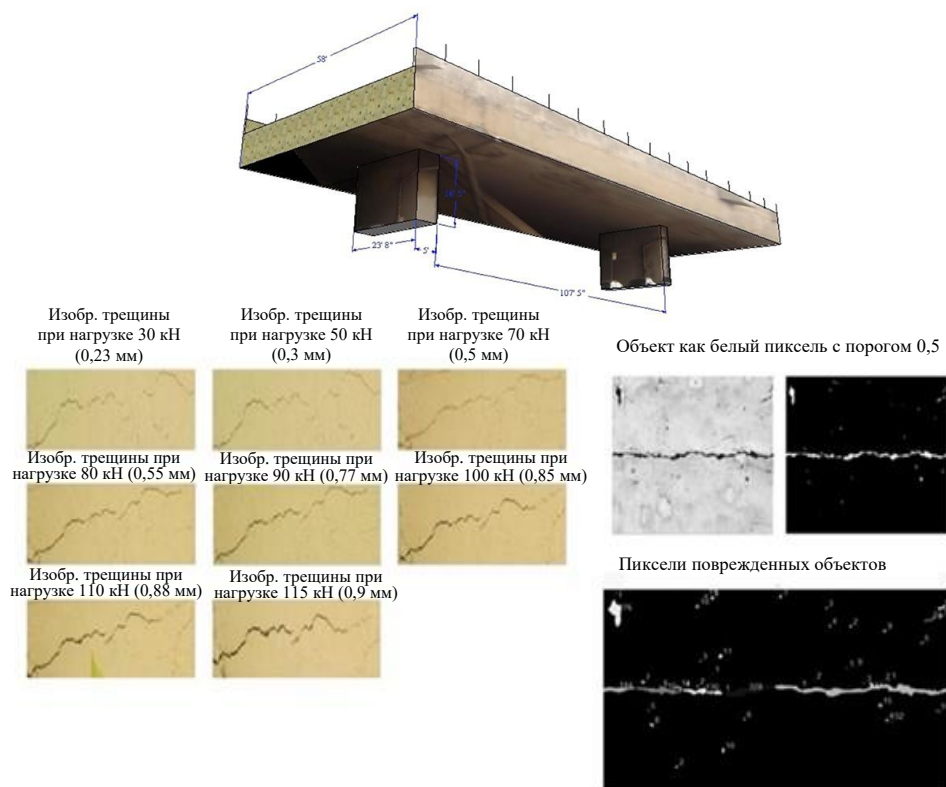


Рис. 2. Цифровой анализ изображений для мониторинга состояния объекта [7]

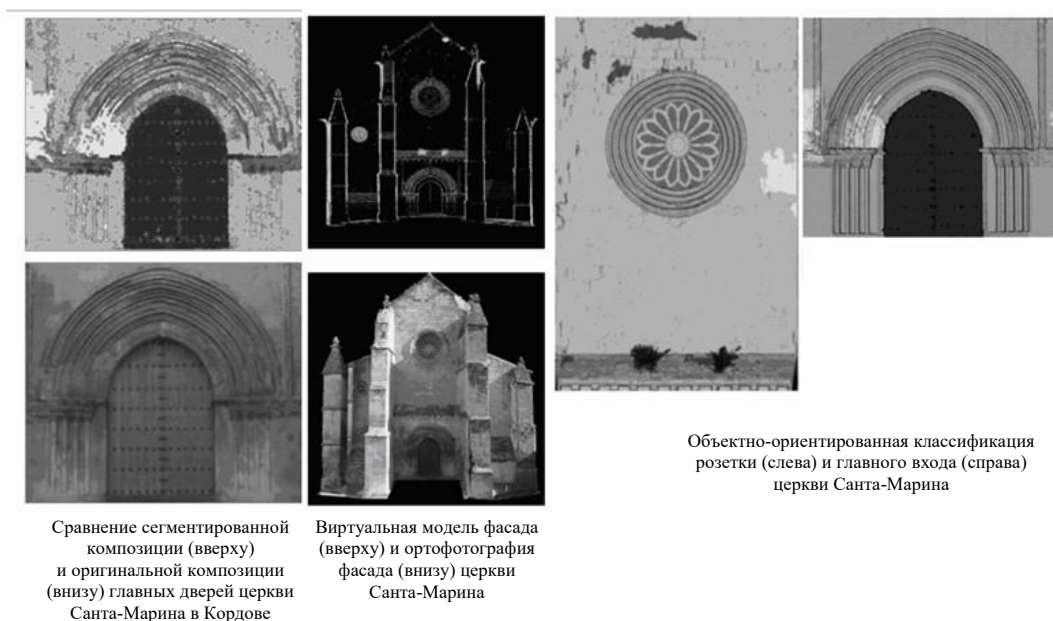


Рис. 3. Интеграция анализа цифрового изображения с лазерным сканированием и BIM [14]

В работе [12] также была описана роль технологии цифровых изображений на этапе строительства для контроля хода работ, где показатели, полученные с помощью предложенной модели, были интегрированы с BIM-моделями для обновления информации о графике и прогнозирования структурных рисков, что позволило снизить зависимость от ручного визуального контроля (рис. 4).

На этапах эксплуатации и ремонта нейронные сети (CNN), обученные на данных LiDAR-съемки, помогли определить дефекты бетонной поверхности с точностью до 95 %, как в исследовании [9], где DenseNet-12 превзошла всех в автоматической классификации и определении размеров повреждений (трещины и высолы) с помощью камер смартфона. Фрактальный анализ с использованием алгоритма подсчета ящиков также способствовал измерению изменений в структурных дефектах без необходимости точной регистрации изображений, поскольку фрактальная размерность увеличилась с 1,13 (основная трещина) до 1,28 (расширенная трещина) на имитационных изображениях, при этом скорость изменения составила 13,26 % по сравнению с преувеличенными

изменениями (до 184 %) в традиционных методах, таких как вычитание изображений. Алгоритм реконструкции поверхности Пуассона преобразовал облако точек в замкнутую и гладкую сетчатую модель, поддерживающую цифровую реконструкцию сложных структур (рис. 5).

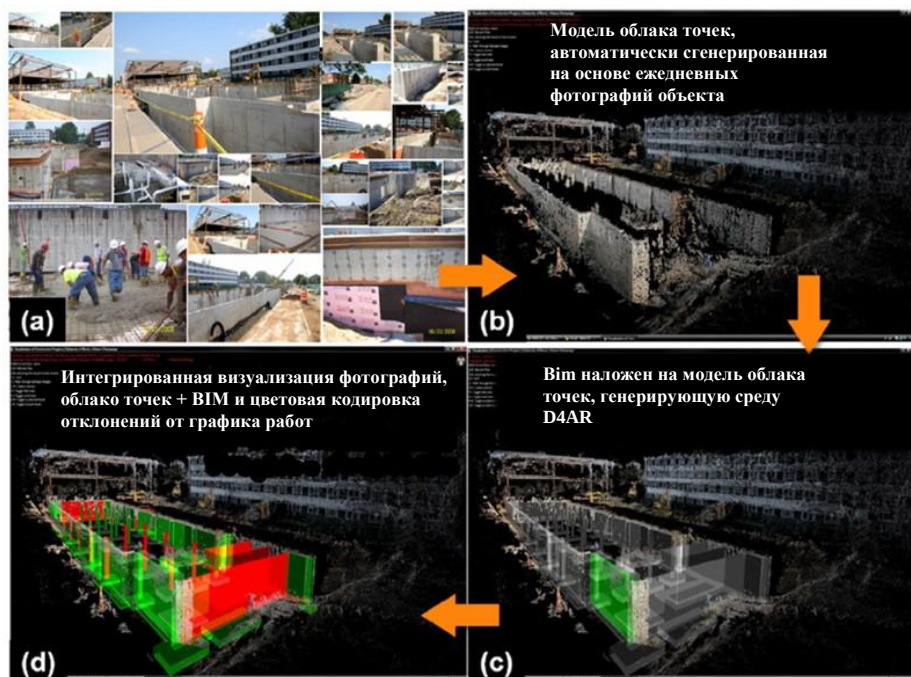


Рис. 4. Цифровой анализ изображений для контроля качества работы на этапе строительства [12]

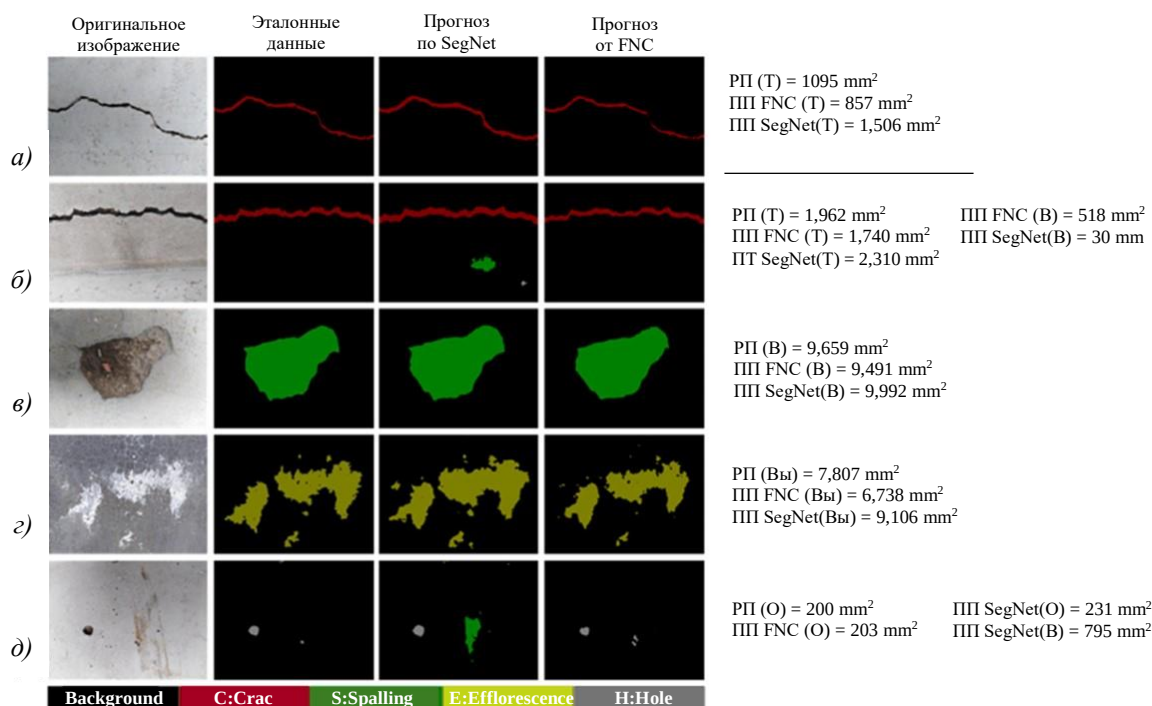


Рис. 5. Метод анализа изображений для прогноза многочисленных дефектов сооружений [7]

Понятие интеграции технологии цифровых изображений в мониторинг объектов и информационное моделирование не ограничивалось областью 3D, а развилось до интеграции с 4D-моделями CAD, что позволило визуализировать фактический прогресс проектов и выявить проблемы, связанные с проектированием и планированием, а также сократить время, человеческие усилия и затраты, необходимые для сбора и обновления данных по проектам. Методика обработки цифровых изображений была применена при строительстве подвесного моста в Корее, где камеры, установленные на стройплощадке, использовались для получения изображений и привязки их к точному временному контексту, а после обработки этих изображений с помощью фильтров (Hue-, Saturation-

и Median) — для удаления шума и выявления нежелательного оборудования. Результаты этой обработки были объединены с графиком проекта с помощью программного обеспечения Jet Stream, что помогло обновить 4D-модель, и они показали точность 92 % для коэффициента точности и правильности установки элементов, а 38 % ошибок были исправлены на этапе проектирования, что позволило сократить затраты на 44 % и уменьшить время строительства на 25 % [15].

Впрочем, оказалось, что на точность результатов сильно влияют условия окружающей среды, такие как плохое освещение и вибрации, так как при применении технологии цифровой обработки изображений в подземном туннеле из-за высокой влажности и тумана точность обнаружения снизилась до 75%. Кроме того, интеграция 3D-изображений с данными (LiDAR) увеличила сложность необходимой технологии обработки на 15%.

2. Технология цифровой обработки изображений в области мониторинга строительных материалов:

В сфере оценки качества строительных материалов методы обработки изображений продемонстрировали превосходную способность анализировать тонкие характеристики строительных смесей. В исследовании [16] алгоритм (Color Segmentation) использовался для определения распределения заполнителей по размерам в асфальтовых смесях, где был рассчитан показатель Image Processing Aggregate Proportion (IPAP), и с помощью этого параметра была определена пропорция заполнителя в смеси с точностью до 85 %, что помогло увеличить прочность дороги на 15 % за счет изменения плотности заполнителя. Мультиспектральная съемка (Multispectral Imaging) в исследовании [5] подтвердила свою действенность в обнаружении коррозии металла в конструкциях с точностью 90 %, анализируя спектральные изменения, вызванные окислением, и сравнивая результаты с лабораторными данными для измерения толщины коррозионного слоя. В то же время в работе [17] для определения коэффициента контакта камня с камнем в проницаемых фрикционных смесях использовался анализ 2D DIP-изображений. Алгоритмы, такие как морфологический анализ, были применены для преобразования изображений в количественные данные, показывающие тесную корреляцию между плотностью контакта гравия и жесткостью поверхностного слоя, что помогло точно настроить качество проектирования смесей. С другой стороны, исследование в [17] было посвящено разработке методик проверки качества промышленных материалов (например, бетона и стали) с использованием статистического анализа изображений для обнаружения тонких дефектов, которые могут повлиять на промышленную безопасность. Например, алгоритмы анализа текстуры применялись к изображениям бетона для выявления крошения или микротрещин, а вейвлет-преобразование использовалось для повышения точности изображений, полученных в не самых лучших условиях освещения (рис. 6). Этот метод позволил сократить время проверки на 30 % по сравнению с традиционными методами.

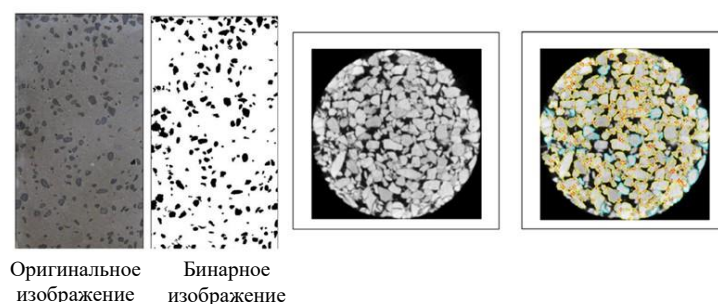


Рис. 6. Анализ цифрового изображения при контроле качества асфальтовой смеси (определение пропорции заполнителя к раствору, определение контактной поверхности между заполнителями) [16]

В рамках исследования [13] оценивалась устойчивость к статической сегрегации в самоуплотняющемся бетоне. Для выявления зон сегрегации использовались такие методы, как преобразование градаций серого и пороговый анализ Otsu, а результаты соотносились с испытаниями на прочность при сжатии для разработки более точных критериев контроля качества. В области легких бетонов исследование [18] способствовало оптимизации бетонных смесей с использованием градиционного индекса S8, полученного в результате анализа цифровых изображений пористых заполнителей (Lightweight Aggregates). Благодаря применению таких алгоритмов, как Semantic Segmentation, распределение заполнителей было измерено с точностью до 0,1 мм, что позволило уменьшить пористость и повысить устойчивость материала к воздействию влаги и солей. Кроме того, исследование [16] внесло вклад в анализ распределения размеров заполнителей в асфальтобетонных смесях с помощью методов обработки изображений. Результаты показали, что анализ изображений с помощью таких алгоритмов, как Particle Counting, позволяет оценить свойства смеси (например, устойчивость к сжатию) без необходимости проведения сложных лабораторных испытаний, сократив при этом расходы на 25 %.

В области практического применения в ходе работы над исследованием [19] была разработана методология оценки сегрегации заполнителей в готовом бетоне путем анализа статических изображений с использованием алгоритмов вариационного анализа. Этот метод позволил улучшить контроль качества при крупномасштабном строительстве, определив зоны сегрегации с точностью до 0,5 мм, что помогло свести к минимуму дорогостоящие корректировки после строительства. В ходе обсуждения проблем в исследовании [18] было отмечено, что анализ асфальтовых смесей с неоднородными заполнителями требует разработки передовых алгоритмов, таких как PointNet, для классификации облака точек, где точность модели достигла 88 % при определении градиента размера заполнителя по сравнению с 65 % для традиционных методов. В статье [7] также обсуждается сложность мониторинга материалов в экстремальных условиях окружающей среды (например, при тумане или сильном ветре), что привело к предложению интегрировать тепловидение с компьютерным зрением для повышения надежности проектов инфраструктуры на открытом воздухе. В рамках преодоления препятствий, связанных с условиями освещения, в исследовании [5] представлена методология соединения технологии обработки изображений с генеративными нейронными сетями, которая позволяет определять и прогнозировать степень коррозии арматурной стали, при этом точность прогнозирования толщины коррозионного слоя достигает 95 %.

Результаты исследования. Результаты контроля состояния конструкций:

1) Исследования подтвердили, что методы цифровой обработки изображений способны обеспечить исключительную точность обнаружения структурных повреждений, но показали, что эффективность варьируется в зависимости от условий эксплуатации. При использовании алгоритма Otsu с медианным фильтром и гауссовым фильтром точность идентификации трещин в бетоне достигла 99,75 %, при этом помехи, вызванные поверхностными дефектами, были снижены на 40 %. Использование сети YOLOv4 также способствовало очень быстрой классификации типов трещин (поверхностные, капиллярные, продольные/поперечные), так как за секунду обрабатывались 120 изображений по сравнению с ручным осмотром, который занимает несколько минут на каждое изображение.

2) Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) доказали свою эффективность для доступа к опасным зонам, таким как эстакады мостов. Использование 4К-камер с алгоритмами эвристической обработки позволило обнаружить коррозию и трещины в бетонной конструкции с точностью 92 %, при этом время осмотра сократилось на 30 %, что увеличило эффективность проактивного обслуживания.

3) Несмотря на эти достижения, на точность результатов сильно влияют условия окружающей среды, такие как плохое освещение или вибрации. В ходе эксперимента в подземном тоннеле точность обнаружения упала до 75 % из-за высокой влажности и тумана, что указывает на необходимость разработки алгоритмов, устойчивых к шуму.

4) Интеграция 3D-изображений (Structure from Motion — SfM) с данными LiDAR увеличила сложность обработки на 15 %, но способствовала созданию подробных цифровых моделей исторических сооружений, что облегчило отслеживание прогрессирующей деградации с течением времени.

Результаты мониторинга строительных материалов:

1) В секторе строительных материалов методы обработки изображений продемонстрировали способность анализировать тонкие характеристики смесей. С помощью индекса IPAP (Image Processing Aggregate Proportion) рассчитан гранулометрический состав асфальтобетонных смесей с точностью 85 %, повышая долговечность дорог на 15 % за счет оптимизации пропорций заполнителей.

2) Генеративные нейронные сети (GAN) показали свою способность моделировать влияние факторов окружающей среды (влажность, соленость воздуха) на коррозию стали, где точность предсказания толщины корродированного слоя достигла 95 %.

Обсуждение и заключение. Несмотря на значительный прогресс, исследования выявили серьезные проблемы, которые ограничивают повсеместное применение этих технологий. На первом месте среди этих проблем стоят плохие условия освещения или случайные вибрации, которые оказывают значительное влияние на точность результатов. Качество оборудования, используемого для получения изображений объектов, также критично: чем ниже разрешение, тем больше времени требуется для обработки данных, что негативно сказывается на сроках реализации масштабных проектов. Для преодоления этих барьеров предложены следующие направления:

- повышение устойчивости к условиям окружающей среды путем разработки алгоритмов, работающих в условиях недостаточной освещенности или тумана;
- интеграция с BIM-системами: прямая связь данных изображений с проектными моделями, повышение точности калибровки;
- расширение сферы применения: включение других материалов.

Цифровая обработка изображений трансформирует мониторинг конструкций и материалов, обеспечивая высокую точность и оперативность. Однако для массового внедрения необходимо устранить технические и экологические ограничения через устойчивые инновации и междисциплинарное сотрудничество. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию алгоритмов под реальные условия эксплуатации, интеграцию с BIM-системами и расширение применения на новые материалы, чтобы максимально реализовать потенциал этих технологий в инженерной практике.

Список литературы/References

1. Sankarasrinivasan S, Balasubramanian E, Karthik K, Chandrasekar U, Gupta R Health Monitoring of Civil Structures with Integrated UAV and Image Processing System. *Procedia Computer Science*. 2015;54:508–515. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.06.058>
2. Del Savio AA, Luna Torres A, Cárdenas Salas D, Vergara Olivera MA, Urday Ibarra GT Detection and Evaluation of Construction Cracks through Image Analysis Using Computer Vision. *Applied Science*. 2023;13:16. <https://doi.org/10.3390/app13179662>
3. Ribeiro D, Santos R, Shibasaki A, Montenegro P, Carvalho H, Calçada R Remote Inspection of RC Structures Using Unmanned Aerial Vehicles and Heuristic Image Processing. *Engineering Failure Analysis*. 2020;117:104813. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104813>
4. Malesa M, Szczepanek D, Kujawińska M, Świercz A, Kołakowski P Monitoring of Civil Engineering Structures Using Digital Image Correlation Technique. *The European Physical Journal Conferences*. 2010;6. <https://doi.org/10.1051/epjconf/20100631014>
5. Galantucci RA, Fatiguso F Advanced Damage Detection Techniques in Historical Buildings Using Digital Photogrammetry and 3D Surface Analysis. *Journal of Cultural Heritage*. 2019;36:51–62. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.09.014>
6. Kim M, Cheng CP, Sohn H, Chang CC A Framework for Dimensional and Surface Quality Assessment of Precast Concrete Elements Using BIM and 3D Laser Scanning. *Automation in Construction*. 2015;49(B):225–238. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.07.010>
7. Spencer BF Jr, Vedhus H, Narazaki Y Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. *Engineering*. 2019;5(2):199–222. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.030>
8. Tworzewski P, Raczkiwicz W, Czapik P, Tworzewska J Diagnostics of Concrete and Steel in Elements of an Historic Reinforced Concrete Structure. *Materials*. 2021;14(2):306. <https://doi.org/10.3390/ma14020306>
9. Nasrollahi M, Bolourian N, Hammad A Concrete Surface Defect Detection Using Deep Neural Network Based on Lidar Scanning. *7th International Construction Conference Jointly With The Construction Research Congress*. Canada; 2019. URL: https://www.researchgate.net/publication/335276365_Concrete_Surface_Defect_Detection_Using_Deep_Neural_Network_Based_on_LiDAR_Scanning (accessed: 29.09.2025).
10. McLaughlin E A Deep Learning Approach for Automating Concrete Bridge Defect Assessment Using Computer Vision. Ontario: University of Waterloo; 2020. 112 p. URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=qX4dW5sAAAAJ&citation_for_view=qX4dW5sAAAAJ:qjMakFHDy7sC (accessed: 29.09.2025).
11. Talab AMA, Huang Z, Xi Fan, HaiMing L Detection Crack in Image Using Otsu Method and Multiple Filtering in Image Processing Techniques. *Optik*. 2016;127(3):1030–1033. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.09.147>
12. Yang J, Park MW, Vela PA, Golparvar-Fard M Construction Performance Monitoring via Still Images, Time-Lapse Photos, and Video Streams: Now, Tomorrow, and the Future. *Advanced Engineering Informatics*. 2015;29(2):211–224. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2015.01.011>
13. Wijaya U, Yulianto Y, Haryanto E Current Literature Review on Image Processing Analysis for Concrete Damage Assessment. *Jurnal Pensil: Pendidikan Teknik Sipil*. 2024;13(3):255–274. <https://doi.org/10.21009/jpensil.v13i3.45042>
14. Meroño JE, Perea AJ, Aguilera MJ, Laguna AM Recognition of Materials and Damage on Historical Buildings Using Digital Image Classification. *South African Journal of Science*. 2015;111(2):10. <https://doi.org/10.17159/sajs.2015/20140001>
15. Kim C, Kim B, Kim H 4D CAD Model Updating Using Image Processing-Based Construction Progress Monitoring. *Automation in Construction*. 2018;35(2):44–52. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.03.005>
16. Moon KH, Falchetto AC, Wistuba MP, Jeong JH Analyzing Aggregate Size Distribution of Asphalt Mixtures Using Simple 2D Digital Image Processing Techniques. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2015;40:1309–1326. <https://doi.org/10.1007/S13369-015-1594-0>
17. Alvarez AE, Mora JC, Espinosa LV Quantification of Stone-on-Stone Contact in Permeable Friction Course Mixtures Based on Image Analysis. *Construction and Building Materials*. 2018;4:462–471. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.189>
18. Barbosa FS, Beaucour AL, Farage MCR, Ortola S Image Processing Applied to the Analysis of Segregation in Lightweight Aggregate Concretes. *Construction and Building Materials*. 2018;25:3375–3381. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.028>
19. Breul P, Geoffray JM, Haddani Y On-Site Concrete Segregation Estimation Using Image Analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2018;6:171–180. <https://doi.org/10.3151/jact.6.171>

Об авторах:

Сабитов Линар Салихзанович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и организации строительного производства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), [ORCID](#), SabitovLS@mgsu.ru

Али Лин, аспирант кафедры технологии и организации строительного производства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ) (129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26), [ORCID](#), lin.ali.97@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

Л.С. Сабитов: научное руководство, формирование основной концепции, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Л. Али: разработка идеи, цели и задачи исследования, подготовка текста, анализ и формирование выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Linar S. Sabitov, Dr.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Technology and Organization of Construction Production at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) (26 Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation), [ORCID](#), SabitovLS@mgsu.ru

Lin Ali, PhD student at the Department of Technology and Organization of Construction Production at the at the National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU) (26 Yaroslavskoe Highway Moscow, 129337, Russian Federation), [ORCID](#), lin.ali.97@mail.ru

Claimed contributorship:

LS Sabitov: scientific supervision, formation of the basic concept, analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

L Ali: development of the idea, aims of the study, preparation of the manuscript, analysis and formation of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 01.10.2025

Поступила после рецензирования / Reviewed 14.10.2025

Принята к публикации / Accepted 28.10.2025