

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное образовательное
учреждение высшего образования
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Бондарь Михаил Дмитриевич

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПРИ
ОБСЛЕДОВАНИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Направление 08.04.01 – «Строительство»

**АВТОРЕФЕРАТ
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Работа выполнена ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель: Сысоев Олег Евгеньевич
доктор технических наук, профессор

Рецензент: Головки Александр Владимирович
доцент кафедры "Строительные конструкции, здания и сооружения" Дальневосточного государственного университета путей сообщения, кандидат технических наук.

Защита состоится «18» июня 2026г. в ____ часов ____ мин. на заседании государственной аттестационной комиссии по направлению подготовки 08.04.01 «Строительство» в Комсомольском-на-Амуре государственном университете по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ФГБОУ ВО «КНАГУ» ауд. _____.

Автореферат разослан ____ июня 2026 г.

Секретарь ГЭК

И.В. Погорельских

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования.

Фонд зданий и сооружений Российской Федерации характеризуется значительной долей объектов, введенных в эксплуатацию 30–50 лет назад. По данным Росстата и экспертных оценок, свыше 60% зданий административного, производственного и складского назначения в настоящее время эксплуатируются за пределами нормативного срока службы (для железобетонных конструкций – 50–75 лет, для кирпичных – 50–100 лет). При этом растут нагрузки на инфраструктуру (увеличение интенсивности транспортных потоков, модернизация оборудования), ужесточаются требования энергоэффективности (Федеральный закон № 261-ФЗ) и промышленной безопасности (Федеральный закон № 384-ФЗ).

Традиционные методы обследования, регламентированные СП 13-102-2003, – визуальный осмотр, простукивание, выборочные шурфы и отбор образцов – не обеспечивают требуемой полноты выявления дефектов, особенно скрытых (пустоты, зоны увлажнения, коррозия арматуры, отслоения). По данным обследований, до 40% дефектов остаются невыявленными при традиционном подходе. Кроме того, эти методы не позволяют создавать цифровые модели состояния, пригодные для дальнейшего мониторинга и информационного моделирования (BIM).

В последние годы активно развиваются инновационные методы дистанционного и инструментального контроля: беспилотные летательные аппараты (БПЛА), наземное лазерное сканирование, георадиолокация, тепловизионный контроль, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия бетона, сенсорные системы мониторинга (SHM). Однако их применение в реальной экспертной практике сдерживается отсутствием целостной методической базы. Нормативная система (ГОСТ 31937-2011, ГОСТ Р 54852-2021 и др.) не легитимизирует результаты таких методов (требуется обязательная верификация шурфованием), не выработаны алгоритмы интеграции разнородных цифровых данных (облака точек, термограммы, радарограммы) и автоматической

идентификации дефектов. Отрасль испытывает острый дефицит специалистов, способных обоснованно выбирать оптимальное сочетание традиционных и инновационных технологий.

Таким образом, проблема исследования обусловлена несоответствием между объективной потребностью в повышении точности, безопасности и оперативности диагностики и отсутствием научно обоснованных алгоритмов выбора и комплексирования инновационных методов. Разработка методики, обеспечивающей обоснованный выбор и комплексирование таких методов, представляет собой актуальную научную задачу, решение которой имеет существенное значение для повышения безопасности и долговечности зданий и сооружений, сокращения затрат на ремонтные работы и предотвращения аварий.

Целью диссертационной работы является выявление и обоснование эффективных инновационных методов обследования зданий и сооружений, способствующих повышению точности и оперативности диагностики состояния объектов строительной инфраструктуры.

Задачи исследования:

- Провести анализ современных технологий дистанционного обследования (БПЛА, лазерное сканирование, фотограмметрия) и систематизировать их по диагностическим и эксплуатационным критериям (глубина контроля, производительность, точность, безопасность, квалификация оператора).

- Изучить инновационные методы инструментальной диагностики строительных конструкций (георадиолокация, тепловизионный контроль, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия бетона, сенсорные системы мониторинга) и оценить их информативность, пределы применимости и погрешности.

- Выполнить анализ современных программных решений для обработки данных обследования (облака точек, фотограмметрические модели) и их интеграции с информационными моделями зданий (BIM), а также методов машинного обучения для автоматического распознавания дефектов.

- Разработать методику комплексного применения инновационных методов, включающую матрицу выбора оптимального набора технологий в зависимости от типа конструкций и ожидаемых дефектов, а также пятиэтапный адаптивный алгоритм формирования программы обследования.

- Выполнить имитационное моделирование на примере типового административно-складского здания с железобетонным каркасом для верификации методики и провести прогнозную экономическую оценку эффективности (сравнение с традиционным подходом).

Объект исследования – процесс технического обследования и диагностики состояния зданий и сооружений на различных этапах их эксплуатации (от плановых осмотров до обследований перед реконструкцией).

Предмет исследования – совокупность инновационных методов и технологий дистанционного и инструментального контроля (лазерное сканирование, фотограмметрия с применением БПЛА, 3D-сканирование, тепловизионная и георадарная съёмка, ультразвуковой и магнитный контроль, сенсорный мониторинг), а также принципы их комплексного применения и интеграции получаемых данных в единую цифровую модель объекта (BIM).

Теоретической и методологической основой исследования

Методологическую основу работы составили методы системного анализа, сравнительной оценки, экспертного моделирования, а также положения теории неразрушающего контроля и технической диагностики. В процессе выполнения диссертации изучены и критически проанализированы труды российских и зарубежных учёных: Вавилов В.П. (тепловизионный контроль), Шошин Е.Л. (георадиолокация), Ключев В.В. (неразрушающий контроль), Крауткремер И. и Г. (ультразвуковой контроль), Eastman С. (BIM-технологии), McCann D.M. (обзор методов НК для бетона), а также нормативно-техническая документация (СП 13-102-2003, ГОСТ 31937-2011, ГОСТ Р 54852-2021, Федеральные законы № 384-ФЗ и № 261-ФЗ). Экспериментальная часть базируется на методах имитационного моделирования с использованием типовых данных реальных объектов.

Автор защищает: результаты системного анализа трёх групп инновационных методов (дистанционных, инструментальных, программных); разработанную матрицу выбора оптимального набора технологий в зависимости от типа конструкций и ожидаемых дефектов; пятиэтапный адаптивный алгоритм формирования программы обследования; результаты моделирования на примере административно-складского здания, подтвердившие сокращение времени полевых работ на 60%, общего времени – на 50%, стоимости – на 24% при увеличении выявления скрытых дефектов в 5,5 раза; прогнозную экономическую оценку (эффект 1 247 тыс. руб. на объект, срок окупаемости 1,5 месяца).

Научная новизна работы заключается в следующем:

- выполнена систематизация и обоснование рациональных областей применения инновационных методов обследования зданий и сооружений в зависимости от типа конструкций, условий доступности и требуемой детализации диагностики, что позволяет перейти от шаблонного подхода к риск-ориентированному;

- в отличие от разрозненного использования отдельных технологий, предложена методика поэтапного комплексирования данных дистанционного зондирования (облака точек лазерного сканирования, фотограмметрические модели с БПЛА) и методов неразрушающего контроля (георадар, термография, ультразвук, магнитный контроль), обеспечивающая формирование информативной цифровой основы объекта (BIM-модели с нанесёнными дефектами);

- разработана классификация дефектов, выявляемых преимущественно дистанционными и тепловизионными методами, по их геометрическим и теплофизическим признакам на трёхмерных моделях (отклонения от вертикали, локальные температурные аномалии, зоны повышенной влажности), что создаёт предпосылки для последующей автоматизации их распознавания с использованием свёрточных нейронных сетей.

Практическая ценность: результатов состоит в возможности их непосредственного внедрения в работу инженерно-диагностических и экспертных организаций. Разработанные методические рекомендации позволяют обоснованно выбирать оптимальный набор инновационных методов, сокращать сроки и стоимость работ (на 24–60%), создавать детализированные цифровые двойники объектов (BIM) для мониторинга в динамике.

Методы исследования. В работе применён комплекс методов: анализ научно-технической литературы и нормативной базы; сравнительный анализ инновационных и традиционных методов диагностики; системный подход; метод экспертных оценок; имитационное моделирование.

Апробация работы и публикации

Основные положения диссертации опубликованы в научной статье:

– Бондарь М.Д. Анализ рынка геодезического оборудования, продаваемого на территории России / М.Д. Бондарь, О.Е. Сысоев // Молодёжь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований : материалы VIII Всероссийской национальной научной конференции молодых учёных, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 апреля 2025 года. – Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ, 2025. – EDN OININH.

Структура и объём работы.

Магистерская диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (63 источника). Основной текст изложен на 76 страницах, содержит 5 таблиц и 23 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель, задачи, предмет и объект исследования, раскрыты научная новизна и практическая значимость, апробация результатов.

В **первой главе** «Технологии дистанционного обследования зданий и сооружений» проведён системный анализ трёх ключевых групп методов бесконтактного сбора пространственной информации: применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), наземное лазерное сканирование и трёхмер-

ное сканирование (включая фотограмметрию и метод структурированного света).

Раздел 1.1 посвящён использованию дронов. Предложена классификация БПЛА по конструктивным особенностям: самолётного типа (взлёт с полосы, длительное время полёта, большая полезная нагрузка – для крупномасштабной аэрофотосъёмки); вертолётного типа (квадрокоптеры, вертикальный взлёт, ограниченное время полёта – для детальных инспекций фасадов и кровель); привязные дроны (питание по кабелю, неограниченное время работы – для длительного мониторинга строительных площадок или послеаварийных объектов). Отмечено, что дроны массой от 250 г до 30 кг подлежат обязательной регистрации согласно Воздушному кодексу РФ. Основные технологии на борту: высокоразрешающие камеры (для визуального осмотра и фотограмметрии), тепловизионные камеры (выявление утечек тепла, перегревов, увлажнения), мультиспектральные датчики. Производительность: до 1000 м² фасадов в час при высоте полёта 30–50 м. Преимущества: безопасность (исключение доступа персонала на высоту), скорость, возможность автоматического программирования маршрутов. Ограничения: необходимость разрешений на полёты, чувствительность к погодным условиям (ветер, дождь), ограниченная точность без наземных контрольных точек.

Раздел 1.2 посвящён лазерному сканированию. Метод основан на измерении времени пролёта лазерного импульса (Time-of-Flight). В результате формируется облако точек с координатами X, Y, Z. Точность современных наземных лазерных сканеров (Leica RTC360, FARO Focus) достигает 1–2 мм на дальности до 100 м. Производительность: до 2 млн точек в секунду. Преимущества: высокая детализация, возможность получения сечений и ортофотопланов, бесконтактность. Показано, что лазерное сканирование позволяет выявлять отклонения от вертикали и горизонтали, деформации каркаса, трещины (раскрытие от 0.5 мм). Недостатки: высокая стоимость оборудования (от 3 млн руб.), необходимость квалифицированной обработки данных.

Раздел 1.3 рассматривает 3D-сканирование, включая фотограмметрию и метод структурированного света. Фотограмметрия – построение 3D-моделей по серии перекрывающихся фотографий (с БПЛА или наземной камеры). Точность при использовании БПЛА – порядка 1:5000 от высоты полёта (например, при высоте 50 м точность ~1 см). Программные продукты: Agisoft Metashape, Pix4Dmapper. Преимущества: низкая стоимость оборудования (требуется только камера), возможность получения текстурированных моделей. Ограничения: зависимость от освещения и текстур поверхности (трудно для однородных поверхностей). Метод структурированного света (проекция узоров) применяется для малых объектов с точностью до 0.1 мм.

В выводах по первой главе подчёркнуто, что ни одна из рассмотренных технологий не решает весь спектр задач, а наиболее рациональным путём является их комплексирование в зависимости от объекта и требуемой детализации. Полученные выводы создают методическую базу для второй главы.

Вторая глава «Инновационные методы диагностики строительных конструкций» детально рассмотрены методы неразрушающего контроля внутреннего строения конструкций: георадиолокация, тепловизионный контроль, ультразвуковая и магнитная дефектоскопия бетона, сенсорные системы мониторинга.

Раздел 2.1 – георадиолокация. Приведены физические основы: излучение электромагнитных импульсов (25–2500 МГц), регистрация отражённого сигнала от границ сред с разными диэлектрическими проницаемостями. Основное уравнение глубины залегания дефекта: $h = (c \cdot t) / (2 \cdot \sqrt{\epsilon})$, где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, t – время двойного пробега, ϵ – диэлектрическая проницаемость (для бетона 6–9, для кирпичной кладки 4–7, для сухой древесины 2–3). Для строительных конструкций оптимальны антенны 400–900 МГц, глубина до 2–3 м, разрешение 3–5 см. Производительность – 300–500 м профилей в смену. Выявляемые дефекты: положение арматуры, пустоты, зоны увлажнения, трещины в бетоне. Ограничения: требуется плотный контакт антенны с поверхностью; сильное затухание во влажных электропроводящих материалах (мокрая

арматурная сетка экранирует сигнал). Приведены примеры радарограмм (рисунки 2.1–2.3 диссертации), показывающие характерные отражения от арматуры и пустот.

Раздел 2.2 – тепловизионный контроль. Основной закон – Стефана-Больцмана: $W = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4$, где ε – коэффициент излучательной способности (для строительных материалов 0.85–0.95), $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴), T – абсолютная температура. При наличии дефекта (пустота, увлажнение, отслоение) тепловое сопротивление меняется, что на поверхности проявляется температурной аномалией. Режимы: пассивный (использование естественного нагрева солнцем или охлаждения ночью) и активный (принудительный нагрев тепловыми пушками). Производительность – до 1000 м²/час. Чувствительность современных тепловизоров – 0.05–0.1 °С. Выявляемые задачи: зоны теплопотерь, протечки кровли, скрытое увлажнение стен, отслоение штукатурки, коррозия под слоем изоляции. Ограничения: необходим перепад температуры (не менее 10–15 °С), сильное влияние ветра и солнечной радиации, сложность интерпретации на поверхностях с переменным коэффициентом излучения.

Раздел 2.3 – ультразвуковая и магнитная дефектоскопия. Ультразвуковой контроль бетона основан на корреляции между скоростью продольной волны V , динамическим модулем упругости E_{dyn} и плотностью ρ : $V = \sqrt{(E_{dyn}/\rho)}$. Для качественного бетона $V = 4000$ – 4800 м/с; при наличии дефектов (раковины, трещины) скорость падает до 3000–3500 м/с. Метод позволяет оценивать прочность по тарировочным кривым «скорость – прочность», выявлять трещины (в том числе глубину методом эхо-импульса), оценивать однородность. Магнитный метод применяется для железобетона: при помощи измерителей толщины защитного слоя (типа «ИЗС» или Profometer) определяют положение и диаметр арматуры, толщину защитного слоя, а также степень коррозии (по изменению магнитных свойств). Ограничения: ультразвук требует акустического контакта (нанесение геля) и неэффективен для сильнозаполненных крупным заполнителем бетонов; магнитный метод применим только для обычной арматурной стали.

Раздел 2.4 – сенсорные системы мониторинга (Structural Health Monitoring, SHM). Описаны типы датчиков: тензодатчики (измерение деформаций, точность до 1 мкм/м), акселерометры (вибрации и динамические колебания, частотный диапазон до 1000 Гц), датчики перемещений (линейные переменные трансформаторы – LVDT), датчики наклона (электролитические, точность до 0.001°), пьезоэлектрические датчики (акустическая эмиссия для обнаружения растущих трещин), волоконно-оптические датчики (распределённые системы на основе брэгговских решёток – FBG, позволяют измерять деформацию и температуру вдоль волокна длиной до 100 м с шагом 1 см). Приведены схемы размещения датчиков на высотном здании (рисунки 2.6–2.7). Преимущества: непрерывность, высокая частота опроса (до 1000 Гц), автоматическая сигнализация о превышении порогов. Ограничения: высокая стоимость развёртывания (до нескольких миллионов рублей), сложность интерпретации больших объёмов данных, ограниченный ресурс датчиков (5–10 лет для тензодатчиков).

В выводах по второй главе обобщены сравнительные характеристики методов в таблице 2.1 (в диссертации) по критериям: выявляемые дефекты, глубина контроля, производительность, контактность, квалификация. Отмечено, что наибольшая достоверность достигается при комплексировании методов: термография выявляет зоны увлажнения, георадар подтверждает наличие пустот, ультразвук оценивает прочность.

В третьей главе «Современные программные решения для анализа данных обследования» рассмотрены этапы обработки цифровых данных, их интеграция с BIM и применение машинного обучения.

Раздел 3.1 – обработка облаков точек и фотограмметрических моделей. Описаны шесть основных этапов: импорт и фильтрация (удаление шумов и выбросов); регистрация (сшивка) облаков с разных позиций – алгоритмы ICP (Iterative Closest Point); классификация (выделение стен, окон, колонн, инженерных систем); построение полигональной модели (триангуляция Делоне); привязка текстур (наложение фотореалистичных изображений); анализ от-

клонений (сравнение с проектной моделью – генерация цветowych карт, рисунок 3.1). Приведены примеры получения моделей из фотограмметрии (рисунки 3.2–3.5): облако связующих точек, плотное облако, полигональная модель, ортофотоплан фасада. Перечислены программные продукты: Leica Cyclone, FARO Scene, Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, CloudCompare, Autodesk ReCap.

Раздел 3.2 – интеграция с информационным моделированием зданий (BIM). Показано, что BIM – это цифровая модель, содержащая геометрию, материалы, свойства, стоимость, даты ремонтов. Интеграция данных обследования в BIM позволяет: сравнивать модель «как построено» (as-built) с проектом (as-designed); вносить дефекты как отдельные элементы с типом, координатами, критичностью и рекомендациями; привязывать протоколы, фотографии, термограммы к элементам; создавать слой состояния (аварийное, ограниченно работоспособное, работоспособное, нормативное). Основные BIM-платформы: Revit (Autodesk), Navisworks, Tekla Structures, Renga, nanoCAD BIM. Показан модуль ReCap для импорта облаков точек в Revit.

Раздел 3.3 – применение методов машинного обучения. Рассмотрены свёрточные нейронные сети (CNN) для распознавания дефектов на изображениях (трещины, коррозия, увлажнение). Основные архитектуры: U-Net (для семантической сегментации), Mask R-CNN (для выделения контуров). Для обучения необходима размеченная выборка (тысячи примеров). Точность современных моделей достигает 85–95%. Перспективы: автоматическое выявление трещин на фотографиях с дронов и термограммах, классификация дефектов, сегментация облаков точек.

В выводах по третьей главе приведена таблица 3.1 сравнения ПО (тип данных, функции, интеграция с BIM, стоимость). Отмечено, что создание цифрового двойника с дефектами – ключевой тренд цифровизации строительной диагностики.

В **четвертой главе** «Разработка методики комплексного применения инновационных методов» представлены результаты анализа нормативной ба-

зы, разработанные алгоритм и матрица выбора, имитационное моделирование и экономическая оценка.

Раздел 4.1 – анализ нормативной базы. Систематизированы документы: Федеральный закон № 384-ФЗ (общие требования), СП 13-102-2003 (ориентирован на традиционные методы, инновационные упоминаются фрагментарно), ГОСТ Р 54852-2021 (термографический метод), ГОСТ 31937-2011 (обследование). Выявлены недостатки: отсутствие легитимизации результатов инновационных методов (требуют верификации шурфованием); нет требований к квалификации операторов (обработка облаков точек, интерпретация радарограмм, управление БПЛА); не установлены допуски и точности для цифровых методов; шаблонность программ (фиксированный процент обследования, без учёта рисков). Сделан вывод о необходимости разработки отраслевых методических документов.

Раздел 4.2 – разработка алгоритма формирования программы обследования (рисунок 4.1 в диссертации). Алгоритм включает пять этапов:

Этап 1. Анализ исходных данных. Собираются чертежи, данные о материале, год постройки, история ремонтов и аварий, условия эксплуатации (нагрузки, агрессивность среды), цели обследования (продление срока службы, реконструкция, оценка ущерба).

Этап 2. Определение диагностических задач и выбор приоритетных технологий. Составляется перечень ожидаемых дефектов. Для каждого типа конструкций по матрице (таблица 4.1) выбираются методы. Матрица содержит пять категорий: фасады и кровли (теплопотери, увлажнение → термография + БПЛА), железобетонные перекрытия (пустоты, коррозия арматуры → георадар + ультразвук), металлические конструкции (коррозия, трещины, отклонения → лазерное сканирование + магнитный контроль), исторические здания (трещины, скрытые полости → БПЛА + георадар + термография), большепролётные сооружения (прогибы, вибрации → сенсорный мониторинг + лазерное сканирование).

Этап 3. Планирование съёмки и полевых работ. Детализируются параметры: для БПЛА – высота, перекрытие снимков (не менее 60%), маршрут; для лазерного сканирования – позиции станций, разрешение; для георадара – сетка профилей, частота антенны; для термографии – режим (пассивный/активный), время суток, настройки.

Этап 4. Обработка и интеграция данных. В соответствующих ПО выполняется фильтрация, регистрация, построение моделей, выявление дефектов, их классификация и верификация (выборочная проверка).

Этап 5. Формирование отчёта и внесение в BIM. Подготавливается заключение с текстом, таблицами, фотографиями, термограммами, радарограммами, а также BIM-модель с нанесёнными дефектами (геометрия, ведомость дефектов, рекомендации).

Раздел 4.3 – моделирование применения методики на примере типового объекта. В качестве объекта выбрано административно-складское здание 1985 года постройки (двухэтажное, 36×24 м, железобетонный каркас, кирпичное заполнение). Принято, что по аналогам вероятность трещин в стенах 70%, следов протечек 50%, сколов бетона 40%.

Реализация алгоритма (моделирование):

- этап 1: изучены проектные чертежи, зафиксирована влажность подвала, срок службы 38 лет;
- этап 2: по матрице выбраны методы: лазерное сканирование (для фиксации геометрии и трещин), термография (увлажнение), георадар (пустоты и арматура), ультразвук (прочность бетона);
- этап 3: приняты параметры – две позиции лазерного сканирования на фасад, термография вечером ($\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$), георадар 400 МГц с сеткой 0,5×0,5 м;
- этап 4: имитация обработки дала: отклонение стен до 35 мм (допуск 20 мм), три зоны увлажнения (соответствуют пустотам на радарограммах), прочность колонн 22–25 МПа (проектная В25 – 25 МПа, снижение 10–15%);

- этап 5: сформирована BIM-модель с дефектами.

Сравнение с традиционным подходом (визуальный осмотр, простукивание, 10 шурфов, отбор кернов) представлено в таблице 4.2 диссертации. Результаты: время полевых работ сократилось с 5 до 2 дней (на 60%); общее время с 12 до 6 дней (50%); стоимость с 380 до 290 тыс. руб. (24%); выявлено скрытых дефектов 11 против 2 (рост в 5,5 раза); повреждений конструкций – 0 против 10 шурфов. Верификация (контрольное бурение в трёх точках) подтвердила расхождения не более 15%.

Раздел 4.4 – экономическое обоснование эффективности (прогнозная оценка). Исходные данные: стоимость человеко-часа бригады – 4,0 тыс. руб./ч; стоимость одного шурфа с заделкой – 3,5 тыс. руб.; стоимость аварийного ремонта при пропуске дефекта (увлажнение + коррозия) – 1 200 тыс. руб.; стоимость планового ремонта по результатам своевременной диагностики – 180 тыс. руб.

Расчёты:

1. Экономия от сокращения времени: $\Delta_{\text{врем}} = (96 \text{ ч} - 48 \text{ ч}) \times 4,0 \text{ тыс. руб./ч} = 192 \text{ тыс. руб.}$
 2. Экономия от исключения 10 шурфов: $\Delta_{\text{шурф}} = 10 \times 3,5 = 35 \text{ тыс. руб.}$
 3. Предотвращённый ущерб: $\Delta_{\text{пред}} = 1\,200 - 180 = 1\,020 \text{ тыс. руб.}$
- Итого $\Delta_{\text{общ}} = 192 + 35 + 1\,020 = 1\,247 \text{ тыс. руб.}$

Структура эффекта: 15,4% – экономия времени, 2,8% – отказ от шурфов, 81,8% – предотвращённый ущерб от раннего выявления дефектов.

Затраты на разработку методики (подготовка документации, обучение, пилотное тестирование) приняты 300 тыс. руб. При двух обследованиях в год годовой эффект $\Delta_{\text{год}} = 2 \times 1\,247 = 2\,494 \text{ тыс. руб.}$ Срок окупаемости $T_{\text{ок}} = 300 / 2\,494 \approx 0,12 \text{ года} \approx \mathbf{1,5 \text{ месяца}}$.

Для экспертной организации, выполняющей 20 обследований в год, при условии, что на половине из них (10) применение инновационной методики даст эффект, сопоставимый с расчётным, годовая экономия составит 12 470 тыс. руб. ($\approx 12,5 \text{ млн руб.}$). Дополнительный эффект – создание цифровых

двойников (BIM), снижающий затраты на последующие обследования на 5–10%.

В выводах по четвёртой главе подведено, что разработанная методика обладает высокой адаптивностью, экономической целесообразностью и может быть рекомендована для внедрения в практику после валидации на реальных объектах.

Выводы по диссертации

Выполненные в магистерской диссертации исследования инновационных методов при обследовании зданий и сооружений, позволяют сделать следующие выводы.

1. Анализ современного состояния технической диагностики показал, что традиционные методы (визуальный осмотр, шурфы, отбор образцов) не обеспечивают полноты выявления скрытых дефектов и не позволяют создавать цифровые модели, пригодные для мониторинга. Свыше 60% зданий эксплуатируются более 30 лет, что повышает потребность в достоверной и оперативной диагностике.

2. Критический анализ нормативно-технической базы (СП 13-102-2003, ГОСТ 31937-2011, ГОСТ Р 54852-2021) выявил её отставание: инновационные методы (БПЛА, лазерное сканирование, георадар, термография) либо не упоминаются, либо требуют обязательной верификации шурфованием, что снижает их эффективность. Отсутствуют требования к квалификации специалистов по обработке облаков точек и интерпретации радарограмм.

3. Проведён системный анализ технологий дистанционного обследования. БПЛА обеспечивают оперативность до 1000 м²/час и безопасный доступ к высотным зонам; лазерное сканирование даёт точность 1–2 мм и детализированные облака точек; фотограмметрия экономически эффективна. Ни один метод не является универсальным – рационально их комплексирование.

4. Исследованы инновационные инструментальные методы: георадиолокация (глубина до 2–3 м, выявление пустот и арматуры), термография (выявление теплопотерь и увлажнения, до 1000 м²/час), ультразвук бетона (оцен-

ка прочности, выявление трещин), магнитный метод (контроль армирования), сенсорный мониторинг (непрерывное слежение за динамикой). Наибольшая достоверность достигается при комплексировании.

5. Рассмотрены программные решения (Agisoft Metashape, Pix4Dmapper, CloudCompare) и интеграция с BIM. Создание цифрового двойника с дефектами позволяет перейти к единой среде управления состоянием здания. Машинное обучение обеспечивает распознавание дефектов с точностью 85–95%, сокращая ручной труд.

6. Разработана методика комплексного применения инновационных методов, включающая пятиэтапный алгоритм (анализ данных → выбор методов по матрице → планирование → обработка → отчёт в BIM) и матрицу выбора технологий в зависимости от типа конструкций. Методика позволяет заменить шаблонные программы риск-ориентированными.

7. Моделирование на примере типового административно-складского здания подтвердило эффективность методики: сокращение времени полевых работ на 60%, общего времени на 50%, стоимости на 24%, увеличение выявленных дефектов в 5,5 раза (с 2 до 11) при полном отсутствии повреждений.

8. Прогнозная экономическая оценка показала эффект 1 247 тыс. руб. на один объект (82% – предотвращение аварийного ремонта). Срок окупаемости затрат на разработку (300 тыс. руб.) – 1,5 месяца. Для организации с 20 обследованиями в год годовой эффект – до 12,5 млн руб.

9. Таким образом, цель исследования достигнута. Разработанная методика обладает высокой адаптивностью и экономической целесообразностью и может быть рекомендована для внедрения в практику инженерно-диагностических организаций после валидации на реальных объектах, а также использована в учебном процессе.

Перспективными направлениями дальнейших исследований являются: разработка нормативных документов, легитимизирующих инновационные методы без обязательной верификации шурфованием; создание отраслевых требований к квалификации специалистов по обработке облаков

точек и интерпретации радарограмм; развитие методов автоматического распознавания дефектов на основе глубокого обучения; интеграция сенсорного мониторинга с цифровыми двойниками для прогнозирования остаточного ресурса.