ЗЕМЛЕУСТРОЙСТВО, КАДАСТР И МОНИТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

Научно-практическая статья/Research article
УДК 528.45:528.721.221.6
https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-112-121

Мониторинг деформаций объектов городской инфраструктуры Москвы с применением лазерного сканирования и 3D-моделирования

А. Р. Байорис[1]✉, А. В. Ершов[1]

[1] Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Российская Федерация

e-mail: baioris1999@mail.ru

Аннотация. Выполненное исследование направлено на разработку и апробирование методики мониторинга деформаций зданий и сооружений, являющихся объектами кадастровых работ. Для получения необходимых параметров мониторинга в разработанной методике реализована интеграция данных лазерного сканирования и тахеометрической съемки. Исходя из требуемой точности для конкретного жилого объекта выбрано измерительное технологическое оборудование (лазерный сканер RLS-3000 и электронный тахеометр Trimble S7), что обеспечило создание цифровой 3D-модели с точностью определения координат характерных точек 2 мм. Для математической обработки результатов измерений было предложено использовать алгоритм ICP, а для автоматической классификации дефектов – метод опорных векторов. В результате применения предложенной методики на исследуемом объекте капитального строительства установлено прогрессирующее развитие трещин с раскрытием от 0,3 до 1,5 мм в год и зафиксировано горизонтальное смещение фундамента на 10,2 мм. Построенные по этим данным графики динамики деформаций и гистограммы распределения дефектов подтверждают эффективность предложенной методики и целесообразность ее применения при выполнении геодезического мониторинга на других объектах капитального строительства.

Ключевые слова: лазерное сканирование, мониторинг деформаций, «умный город», 3D-моделирование, облако точек, метод опорных векторов, городская инфраструктура

Для цитирования:
Байорис А. Р., Ершов А. В. Мониторинг деформаций объектов городской инфраструктуры Москвы с применением лазерного сканирования и 3D-моделирования. *Вестник СГУГиТ.* 2026. Т. 31, № 5. С. 112–121. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-112-121

Deformation monitoring of Moscow's urban infrastructure using terrestrial laser scanning and 3D modeling

A. R. Bayoris[1]✉, A. V. Ershov[1]

[1] Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

e-mail: baioris1999@mail.ru

© А. Р. Байорис, А. В. Ершов, 2026

Abstract. The study introduces and validates a high-fidelity structural health monitoring framework specifically designed for real estate cadastral applications and asset lifecycle management. The proposed methodology synergizes Terrestrial Laser Scanning and high-precision total station observations to resolve comprehensive 3D deformation vectors. Instrument selection (the RLS-3000 laser scanner and Trimble S7 total station) was governed by stringent project-specific accuracy thresholds, enabling the reconstruction of a centimeter-level reality model characterized by point cloud registration residuals not exceeding 2 mm. To process the acquired multimodal datasets, the authors employed the Iterative Closest Point algorithm for sub-millimetric fine registration and change detection, while a Support Vector Machine classifier was implemented for automated structural defect classification. Field validation on the target structure revealed active deterioration dynamics, quantified as progressive crack propagation ranging from 0.3 to 1.5 mm/year and a cumulative horizontal foundation displacement of 10.2 mm. Time-series analysis and statistical distribution histograms derived from these measurements substantiate the methodological robustness and sensitivity of the workflow. Consequently, this integrated approach establishes a new baseline for transitioning from periodic episodic surveys to continuous, data-driven monitoring regimes for critical infrastructure assets.

Keywords: laser scanning, deformation monitoring, smart city, 3D modeling, point cloud, support vector machine (SVM), urban infrastructure

For citation:
Bayoris A. R., Ershov A. V. (2026). Deformation monitoring of Moscow's urban infrastructure using terrestrial laser scanning and 3D modeling. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 112–121. https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-112-121

Введение

Эксплуатационная безопасность и долговечность объектов городской инфраструктуры являются критически важными факторами устойчивого развития мегаполисов. В условиях Москвы, где значительная часть жилого фонда и инженерных сетей эксплуатируется десятилетиями, проблема старения и износа конструкций усугубляется ростом нагрузок и воздействием техногенных факторов. Статистика последних лет фиксирует рост аварийности на инженерных сетях центральных районов Москвы [1, 2], что требует перехода к предиктивному обслуживанию городской инфраструктуры, являющемуся не только ключевым элементом концепции «умного города», но и важнейшей задачей современного геодезического обеспечения кадастровых работ, направленного на поддержание актуальности сведений об объектах недвижимости [3–6].

Существующие традиционные методы геодезического мониторинга (нивелирование, тахеометрическая съемка выборочных точек) обеспечивают необходимую точность, но обладают низкой пространственной детализацией, высокой трудоемкостью и не позволяют сформировать целостную цифровую модель объекта для комплексного анализа. В свою очередь, активно развивающиеся технологии дистанционного зондирования, такие как аэрофотосъемка, обеспечивают широкий охват, но недостаточны для фиксации деформаций с требуемой для конструкций точностью в несколько миллиметров. Несмотря на успешное применение интегрированных методов лазерного сканирования и фотограмметрии для контроля строительных работ [7], для мониторинга деформаций необходим подход, обеспечивающий субмиллиметровую точность.

Технология наземного лазерного сканирования (НЛС) позволяет преодолеть эти ограничения, обеспечивая создание трехмерных моделей объектов в виде облаков точек. В последние годы накоплен значительный опыт применения НЛС для мониторинга исторических памятников, уникальных строительных объектов и промышленных сооружений [8–11]. Однако вопросы комплексного использования НЛС для синхронного мониторинга массовой жилой застройки и сопряженных с ней линейных инженерных объектов (таких

как линии электропередачи) в условиях плотной городской застройки, а также методики автоматизированного анализа получаемых разновременных данных для целей «умного города» остаются разработанными недостаточно. В частности, требуют дальнейшего исследования и адаптации алгоритмы сравнения облаков точек (ICP – Iterative Closest Point) [12] и методы машинного обучения для классификации типов дефектов [13].

Целью данного исследования является разработка и апробация методики геодезического мониторинга деформаций зданий и сооружений, являющихся объектами кадастровых работ, с использованием данных лазерного сканирования, обеспечивающей получение количественных данных, необходимых для актуализации сведений кадастрового учета и долгосрочного прогнозирования технического состояния объектов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

– выполнен комплекс полевых измерений, включающий тахеометрическую съемку и лазерное сканирование жилого дома и линий электропередачи;

– построены 3D-модели объектов в местной системе координат МСК-50 для последующего создания их цифровых двойников;

– разработаны и применены алгоритмы на основе ICP и метода опорных векторов (SVM) для автоматического выявления и классификации деформаций и дефектов по разновременным данным. Метод опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) представляет собой алгоритм машинного обучения с учителем, предназначенный для решения задач бинарной классификации. В контексте настоящего исследования SVM используется для автоматического разделения точек облака на два класса: «фоновая поверхность» (неповрежденные участки фасада) и «дефект» (трещины, сколы, выбоины);

– провести количественный анализ динамики развития дефектов и интерпретировать полученные результаты для целей предиктивного обслуживания городской инфраструктуры.

Научная новизна статьи заключается в разработке методики мониторинга, адаптированной к требованиям кадастрового учета и сочетающей тахеометрическую съемку для контроля смещений с лазерным сканированием для получения детальной непрерывной модели поверхности и деформаций, а также в адаптации алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации дефектов конструкций на основе облаков точек, что позволяет формировать пространственные данные, пригодные для целей 3D-кадастра [13].

Методы и материалы

В качестве объекта мониторинга выбрано жилое здание высотой 50 м, расположенное в центральном административном округе г. Москвы и являющееся типичным объектом капитального строительства, подлежащим кадастровому учету, а также прилегающие к нему воздушные линии электропередачи (ЛЭП), проходящие на расстоянии до 50 м от здания. Выбор объекта обусловлен его представительностью для застройки данного типа, длительным сроком эксплуатации (более 40 лет) и наличием визуально наблюдаемых трещин на фасаде, что свидетельствовало о потенциальной активности деформационных процессов и требовало актуализации сведений о его техническом состоянии. Исследования включали пять измерительных циклов с интервалом 3 месяца. Основной массив данных для сравнения облаков точек получен в начальном и конечном циклах (интервал 12 месяцев), промежуточные наблюдения за раскрытием трещин выполнены тахеометрическим методом.

Для измерения раскрытия трещин использовался тахеометр Trimble S7 в режиме высокоточного измерения расстояний (СКО 0,5 мм на отражающую пленку), что позволило регистрировать изменения с субмиллиметровой точностью. Лазерное сканирование применялось для общей оценки геометрии и выявления зон концентрации дефектов, тогда как количественные параметры трещин (0,3–1,5 мм) определены по данным тахеометрических наблюдений за деформационными марками, установленными поперек трещин.

Выбор оборудования и методики измерений обеспечивает соответствие требованиям действующих нормативных документов к точности

геодезического мониторинга деформаций (ГОСТ 24846–2019, СП 126.13330.2017). Для зданий I и II уровня ответственности, к которым относятся жилые многоквартирные дома, СКО определения смещений по цифровым моделям не должна превышать 2 мм. Достигнутая в настоящем исследовании точность построения 3D-моделей 2 мм полностью удовлетворяет этому требованию и позволяет достоверно фиксировать деформации, значимые для оценки технического состояния объекта. Аналогичные подходы к обеспечению высокой точности мониторинга с использованием НЛС описаны в работах [8, 10].

Обработка данных выполнялась с использованием следующего программного обеспечения:

– Faro Scene 2022 – для первичной обработки облаков точек (сшивка, фильтрация, окраска);

– Autodesk AutoCAD Civil 3D 2023 – для создания векторных 3D-моделей и проведения измерений;

– CloudCompare, V 2.12.4 – для сравнения разновременных облаков точек алгоритмом ICP [12];

– ПО на базе библиотек Python (Scikit-learn) – для реализации алгоритма машинного обучения SVM (Support Vector Machine) с целью классификации дефектов [13].

Полевой этап включал последовательное выполнение следующих операций:

– создание опорной геодезической сети выполнено путем закладки на устойчивых участках территории вокруг объекта сети из 8 пунктов, координаты и высоты которых определены в замкнутых тахеометрических ходах в местной системе координат МСК-50 и Балтийской системе высот 1977 г. Данная сеть служила долговременной стабильной основой для всех измерений. Схема геодезических построений представлена на рис. 1;

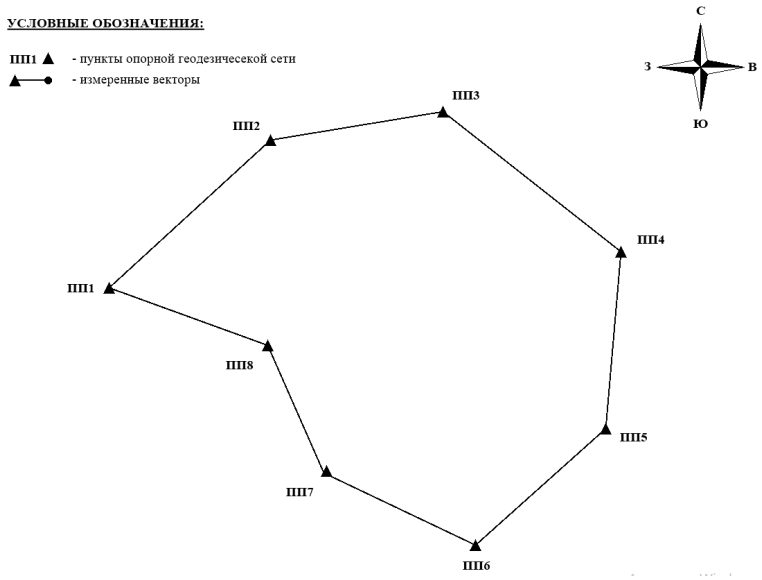


Рис. 1. Схема геодезических построений

– тахеометрическая съемка включала определение с опорных пунктов координат реперных марок, жестко закрепленных на цоколе, углах и перекрытиях здания, а также на опорах ЛЭП. Кроме того, тахеометром были определены координаты сканерных целей (сферических и плоских), которые впоследствии использовались для геопривязки облаков точек. Для оценки точности были выполнены контрольные измерения и уравнивание сети. Погрешность положения реперов, оцененная как СКО из результатов уравнивания, в плане и по высоте не превысила 2 мм.

Лазерное сканирование выполнялось с восьми станций, расположенных на расстояниях 20–40 м от сканируемых поверхностей, что обеспечило измерения с паспортной точностью сканера RLS-3000 (±2 мм на 50 м).

Плотность сканирования на объекте составляла 3 мм на расстоянии 10 м.

Методика камеральной обработки и анализа данных содержит следующие этапы:

– построение единого облака точек выполнено в программной среде Faro Scene путем сшивания данных со всех станций сканирования с использованием геодезических (сканировочных) целей. Для удаления выбросов проведена фильтрация шумов алгоритмом Statistical Outlier Removal (SOR) [14];

– создание 3D-модели осуществлялось в AutoCAD Civil 3D, куда было импортировано отфильтрованное облако точек и на его основе построена триангуляционная (TIN) / поверхностная модель здания и линейных объектов (ЛЭП);

– математическая обработка разновременных данных выполнялась с использованием алгоритма ICP в среде CloudCompare. Попарное сравнение облаков, полученных с интервалом в 1 год, с параметром максимального расстояния сопоставления 5 мм [12] позволило построить карты расстояний, визуализирующие зоны смещений и дающие количественную оценку деформаций;

– автоматическое выявление дефектов с использованием SVM заключалось в классификации участков облака точек на «фоновую поверхность» и «дефект» (трещины, сколы) с помощью метода опорных векторов [13]. Признаками для обучения модели служили дисперсия нормалей в окрестности точки, среднеквадратическое отклонение высот и градиент поверхности. Модель обучена на размеченной выборке, содержащей 5 000 примеров «дефект» и 15 000 примеров «фон».

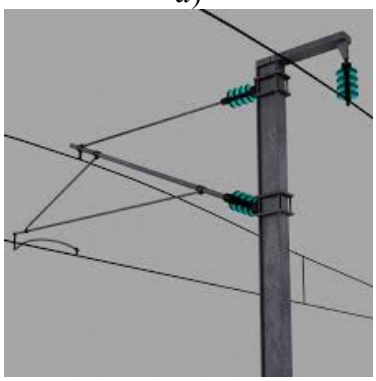
Контроль точности координат характерных точек контура здания, полученных по 3D-модели, был выполнен путем решения обратной геодезической задачи. Сравнивались расстояния и превышения между контрольными точками, измеренные тахеометром Trimble S7, с аналогичными величинами, вычисленными по данным сканирования. Максимальное расхождение не превысило 2 мм, что соответствует требованиям к точности определения координат характерных точек объектов недвижимости, установленным нормативными документами, и подтверждает пригодность модели для кадастровых работ.

Результаты

В результате комплексной обработки данных лазерного сканирования и тахеометрической съемки были построены цифровые 3D-модели объектов исследования. Общее облако точек составило 12 млн измерений. На его основе в программной среде AutoCAD Civil 3D создана 3D-модель жилого дома и прилегающих линий электропередачи (рис. 2). Пространственное положение модели задано в местной системе координат МСК-50 и Балтийской системе высот 1977 г., что обеспечивает ее интеграцию в общегородские информационные системы. Погрешность определения координат характерных точек контура здания, оцененная как максимальное расхождение между координатами, полученными по 3D-модели, и независимыми тахеометрическими измерениями, не превысила 2 мм, что удовлетворяет требованиям к точности кадастровых работ.



а)



б)

Рис. 2. Цифровая 3D-модель здания:

а) вид здания; *б*) линия электропередачи

Сравнение облаков точек, полученных с интервалом в 12 месяцев, с использованием алгоритма ICP [12] позволило количественно оценить смещения элементов конструкций. Анализ выявил устойчивую зону деформаций в области цокольной части здания. Максимальное зафиксированное смещение составило 10,2 мм. Среднеквадратическая погрешность выполнения процедуры ICP, рассчитанная как СКО расстояний между соответствующими точками на стабильных (неизменных) участках фасада после их оптимального выравнивания, составила 1,8 мм, что подтверждает статистическую значимость выявленных смещений.

На основе данных, полученных с помощью алгоритма SVM [13], был проведен анализ развития трещин на фасаде. Для количественной оценки динамики выбраны четыре трещины (T1–T4), обладающие наибольшей протяженностью и четко идентифицируемые на разновременных сканах. Измерения раскрытия выполнялись тахеометром Trimble S7 с интервалом 3 месяца; результаты пяти циклов наблюдений указаны в таблице.

Результаты измерения раскрытия трещин и параметры линейной регрессии

Трещина	Раскрытие, мм, в цикле				Уравнение регрессии*	R^2	Скорость раскрытия, мм/мес.
	3 мес.	6 мес.	9 мес.	12 мес.			
T1	0,40	0,78	1,14	1,50	y = 0,003 + 0,125t	0,997	0,125
T2	0,22	0,49	0,73	1,00	y = –0,004 + 0,083t	0,996	0,083
T3	0,14	0,27	0,43	0,58	y = –0,002 + 0,049t	0,998	0,049
T4	0,08	0,15	0,22	0,31	y = –0,001 + 0,026t	0,997	0,026

* *Примечание*. У – раскрытие трещины, мм; t – время от начала наблюдений, мес.; R^2 – коэффициент детерминации.

Для наиболее активной трещины T1 скорость раскрытия, определенная по линейной модели, составила 0,125 мм/мес. при максимальном раскрытии за год 1,50 мм. Для трещин T2–T4 скорость раскрытия варьировалась от 0,026 до 0,083 мм/мес. Высокие значения коэффициента детерминации ($R^2 \geq 0,996$) подтверждают устойчивый линейный характер развития деформаций. Графическая интерпретация динамики раскрытия трещин на фасаде дома приведена на рис. 3.

Для выявления закономерностей распределения повреждений по высоте здания была построена гистограмма на основе данных, полученных методом SVM (рис. 4). Анализ показал, что более 65 % всех идентифицированных дефектов (трещин, сколов) сосредоточено в нижней части здания (0–15 м). На высотах от 15 до 35 м расположено около 30 % дефектов, в то время как на верхних этажах (выше 35 м) их доля не превышает 5 %.

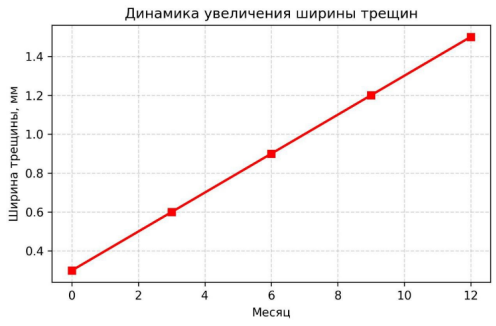


Рис. 3. График динамики раскрытия трещин на фасаде дома

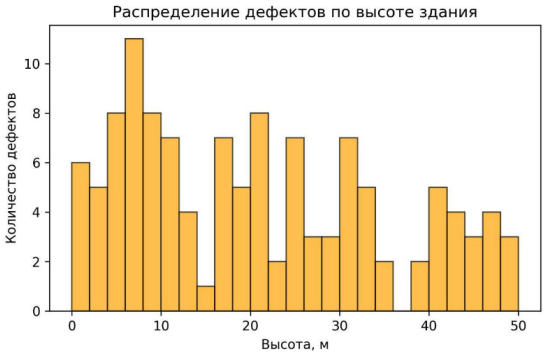


Рис. 4. Гистограмма распределения дефектов по высоте здания

Контроль положения проводов ЛЭП относительно фасада здания показал отсутствие критических изменений за период наблюдений. Максимальное зафиксированное смещение точек крепления проводов на опорах составило 3,1 мм. Данная величина сопоставима с предельной погрешностью метода, что не позволяет однозначно утверждать о наличии деформаций, однако требует продолжения мониторинга для выявления возможного тренда.

Блок-схема разработанной методики представлена на рис. 5.

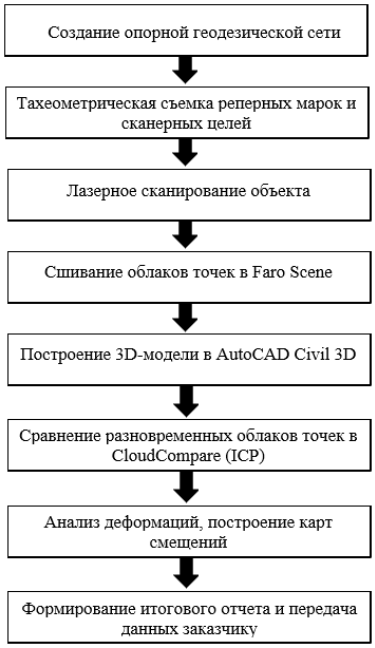


Рис. 5. Блок-схема разработанной методики мониторинга деформаций объектов капитального строительства

Обсуждение

Проведенное исследование продемонстрировало высокую эффективность комплексного использования тахеометрической съемки и наземного лазерного сканирования для решения задач мониторинга городской инфраструктуры. Полученные результаты позволяют сделать ряд важных выводов, имеющих как методическое, так и прикладное значение:

– горизонтальное смещение фундамента 10,2 мм при погрешности 1,8 мм статистически значимо и свидетельствует о продолжающихся деформациях, типичных для старой застройки. Принципиальное преимущество предложенной методики – не только регистрация величины смещения, но и получение непрерывного поля смещений с точной пространственной привязкой к элементам конструкции, что позволяет локализовать зоны концентрации напряжений и строить прогноз развития дефектов. Это подтверждает ценность облаков точек как геометрической основы цифровых двойников [15];

– линейный характер смещений (см. рис. 3) указывает на постоянство действующих факторов (ползучесть, вибрации, гидрогеологические колебания); установление точных причин потребует дополнительных инженерно-геологических изысканий;

– установленная по данным регрессии линейная зависимость раскрытия трещин ($R^2 \geq 0{,}996$, скорость до 0,125 мм/мес.) свидетельствует о прогрессирующем характере деформаций под действием постоянных факторов. Использование SVM обеспечило объективную количественную оценку дефектов, что повышает надежность прогноза [13];

– концентрация более 65 % дефектов в нижней зоне (0–15 м), представленная на гистограмме (см. рис. 4), объясняется максимальными весовыми нагрузками и воздействием влаги, реагентов и перепадов температур. Это необходимо учитывать при планировании ремонтных работ.

Практическая значимость и ограничения: разработанная методика геодезического мониторинга позволяет не только констатировать текущее состояние, но и строить краткосрочный прогноз развития деформаций. Полученные результаты могут быть непосредственно использованы для актуализации сведений Единого государственного реестра недвижимости (ЕГРН), подготовки технических планов и ведения 3D-кадастра. Методика может быть рекомендована для выполнения геодезического мониторинга деформаций на других объектах капитального строительства, сведения о которых подлежат внесению в ЕГРН. Интеграция таких данных в платформу «умного города» позволит перейти к предиктивной модели управления инфраструктурой, ми-

нимизирующей риски возникновения аварийных ситуаций [1, 2]. Полученные цифровые модели также могут служить основой для внедрения технологий информационного моделирования зданий (BIM) [16] и цифровых двойников городской среды [15]. Основным ограничением метода является его относительно высокая стоимость и трудоемкость на этапе полевых работ и первичной обработки данных по сравнению с традиционными методами. Однако этот недостаток компенсируется беспрецедентной полнотой и объективностью получаемой информации, что для критически важных объектов является определяющим фактором.

Таким образом, представленные результаты не только подтверждают эффективность примененного методического подхода, но и вносят вклад в понимание механизмов деформации типовой жилой застройки, предоставляя инструментарий для перехода к ее интеллектуальному мониторингу и управлению в рамках концепции «умного города».

Заключение

Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность разработанной методики мониторинга объектов городской инфраструктуры с интеграцией данных лазерного сканирования и тахеометрической съемки [8, 10]. В ходе работы были получены следующие основные результаты и выводы:

– разработана и апробирована методика геодезического мониторинга деформаций объектов капитального строительства, обеспечивающая создание цифровых 3D-моделей с точностью определения координат характерных точек 2 мм, подтвержденной верификацией с тахеометрическими измерениями. Методика включает комплекс полевых измерений и алгоритмы камеральной обработки (ICP, SVM), что позволяет перейти от выборочного контроля к непрерывному пространственному мониторингу и получать данные, пригодные для целей кадастрового учета и 3D-кадастра [11];

– установлены количественные параметры деформационных процессов: с точностью, превышающей погрешность измерений, зафиксировано смещение фундамента здания на 10,2 мм и выявлена линейная динамика раскрытия трещин на фасаде со скоростью до 0,125 мм/мес., что свидетельствует о прогрессирующем характере деформаций;

– выявлена закономерность пространственного распределения дефектов: более 65 % повреждений сосредоточено в нижней части здания (0–15 м), что указывает на определяющую роль факторов влажности, вибрационных нагрузок и эксплуатационного износа в деградации конструкций именно этой зоны;

– подтверждена практическая значимость методики для системы «умного города»: предложенный аналитический подход на основе разновременных 3D-моделей позволяет не только оценивать текущее состояние, но и строить краткосрочный прогноз развития деформаций (например, путем экстраполяции линейного тренда раскрытия трещин). Это демонстрирует возможность перехода от реагирования на уже произошедшие аварии к планированию профилактических работ на основе прогнозируемого технического состояния, что составляет суть предиктивного (прогнозного) подхода к управлению инфраструктурой [1, 2].

Перспективы дальнейших исследований связаны с автоматизацией обработки данных, интеграцией разработанной методики в общегородские геоинформационные системы, а также с адаптацией подхода для мониторинга других типов инфраструктурных объектов (мостов, тоннелей, объектов культурного наследия, подземных коммуникаций [17]).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Sanusi B. O. Smart Infrastructure: Leveraging IoT and AI for Predictive Maintenance in Urban Facilities. SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology. 2025. Vol. 17(02). P. 26–37.

2. Singh P. et al. Enhancing smart city infrastructure through IoT-enabled predictive maintenance and real-time data analytics. 2024 International Conference on Progressive Innovations in Intelligent Systems and Data Science (ICPIDS). IEEE. 2024. P. 129–137.

3. Wang J. et al. Progress of standardization of urban infrastructure in smart city. Standards. 2022. Vol. 2(3). P. 417–429.

4. Приоритетные направления внедрения технологий умного города в российских городах. Пространственное развитие: экспертно-аналитический доклад [Электронный ресурс]. URL: https://www.csr.ru/upload/iblock/bdc/bdc711b002e9651fb2763d98c7f7daa6.pdf.

5. Золотых З. А., Борецкий Д. С. Умный город как способ организации городской среды. Тенденции развития науки и образования. 2024. Т. 105. № 13. С. 15–18.

6. Аврунев Е. И., Горобцов С. Р. Геодезическое обеспечение кадастровых работ : монография. Новосибирск : СГУГиТ, 2024. 239 с.

7. El-Omari S., Moselhi O. Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. Automation in construction. 2008. Vol. 18(1). P. 1–9.

8. Mukupa W. et al. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. Survey review. 2017. Vol. 49(353). P. 99–116.

9. Lindenbergh R., Pietrzyk P. Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning. Applied Geomatics. 2015. Vol. 7(2). P. 65–74.

10. Шоломицкий А. А., Ханнанов Р. Р., Олейникова Е. А. Особенности обработки и анализа результатов наземного лазерного сканирования при геодезическом мониторинге земляных дамб. Вестник СГУГиТ. 2024. Т. 29, № 2. С. 31–40.

11. Алтынцев М. А., Карпик П. А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 2. С. 121–139.

12. Yuan H. et al. Research on the Improved ICP Algorithm for LiDAR Point Cloud Registration. Sensors. 2025. Vol. 25(15). P. 4748.

13. Ge Y. et al. Automated detection and characterization of cracks on concrete using laser scanning. Journal of Infrastructure Systems. 2023. Vol. 29(2). P. 04023005.

14. Qu C. et al. Point clouds outlier removal method based on improved mahalanobis and completion. IEEE Robotics and Automation Letters. 2022. Vol. 8(1). P. 17–24.

15. Scalas A. et al. Potential of the geometric layer in urban digital twins //ISPRS International Journal of Geo-Information. 2022. Vol. 11(6). P. 343.

16. Талапов В. В. Технология BIM: суть и особенности внедрения информационного моделирования зданий. М. : ДМК–Пресс, 2015. 410 с.

17. Lai Q. et al. Structural Analysis and 3D Reconstruction of Underground Pipeline Systems Based on LiDAR Point Clouds. Remote Sensing. 2025. Vol. 17(2). P. 341.

REFERENCES

1. Sanusi, B. O. (2025). Smart Infrastructure: Leveraging IoT and AI for Predictive Maintenance in Urban Facilities. *SAMRIDDHI: A Journal of Physical Sciences, Engineering and Technology, 17*(02), 26–37.

2. Singh, P. et al. (2024). Enhancing smart city infrastructure through IoT-enabled predictive maintenance and real-time data analytics. In *2024 International Conference on Progressive Innovations in Intelligent Systems and Data Science (ICPIDS)* (pp. 129–137). IEEE.

3. Wang, J., Liu, C., Zhou, L., Xu, J., Wang, J., & Sang, Z. (2022). Progress of standardization of urban infrastructure in smart city. *Standards, 2*(3), 417–429.

4. Priority directions for implementing smart city technologies in Russian cities. Spatial development: expert-analytical report. Retrieved from https://www.csr.ru/upload/iblock/-bdc/bdc711b002e9651fb2763d98c7f7daa6.pdf [in Russian].

5. Zolotykh, Z. A., & Boretskii, D. S. (2024). Smart city as a way of organizing the urban environment. *Tendentsii razvitiia nauki i obrazovaniia [Trends in the Development of Science and Education], 105*(13), 15–18 [in Russian].

6. Avrunev, E. I., & Gorobcov, S. R. (2024). *Geodezicheskoe obespechenie kadastrovyh rabot [Geodetic support of cadastral works]*. Novosibirsk: SSUGT, 239 p. [in Russian].
7. El-Omari, S., & Moselhi, O. (2008). Integrating 3D laser scanning and photogrammetry for progress measurement of construction work. *Automation in Construction, 18*(1), 1–9.
8. Mukupa, W. et al. (2017). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review, 49*(353), 99–116.
9. Lindenbergh, R., & Pietrzyk, P. (2015). Change detection and deformation analysis using static and mobile laser scanning. *Applied Geomatics, 7*(2), 65–74.
10. Sholomitskii, A. A., Khannanov, R. R., & Oleinikova, E. A. (2024). Features of processing and analysis of terrestrial laser scanning results in geodetic monitoring of earth dams. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 29*(2), 31–40 [in Russian].
11. Altyntsev, M. A., & Karpik, P. A. (2020). Methodology for creating digital three-dimensional models of infrastructure facilities of oil and gas production complexes using terrestrial laser scanning. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 25*(2), 121–139 [in Russian].
12. Yuan, H. et al. (2025). Research on the Improved ICP Algorithm for LiDAR Point Cloud Registration. *Sensors, 25*(15), 4748.
13. Ge, Y. et al. (2023). Automated detection and characterization of cracks on concrete using laser scanning. *Journal of Infrastructure Systems, 29*(2), 04023005.
14. Qu, C. et al. (2022). Point clouds outlier removal method based on improved mahalanobis and completion. *IEEE Robotics and Automation Letters, 8*(1), 17–24.
15. Scalas, A. et al. (2022). Potential of the geometric layer in urban digital twins. *ISPRS International Journal of Geo-Information, 11*(6), 343.
16. Talapov, V. V. (2015). *Tekhnologiia BIM: sut' i osobennosti vnedreniia informatsionnogo modelirovaniia zdanii [BIM technology: essence and features of implementing building information modeling]*. Moscow: DMK–Press, 410 p. [in Russian].
17. Lai, Q. et al. (2025). Structural Analysis and 3D Reconstruction of Underground Pipeline Systems Based on LiDAR Point Clouds. *Remote Sensing, 17*(2), 341.

Об авторах

Александра Ромасовна Байорис – аспирант кафедры землеустройства и кадастров.
Анатолий Викторович Ершов – кандидат технических наук, доцент кафедры землеустройства и кадастров.

Author details

Alexandra R. Bayoris – PhD Student, Department of Land Management and Cadastres.
Anatoly V. Ershov – PhD, Associate Professor, Department of Land Management and Cadastres.

Получено / Received 05.11.2025
Поступила после рецензирования / Revised 22.12.2025
Принята к публикации / Accepted 10.09.2026