

С. Д. Плотников¹✉

Методика исследования точности и воспроизводимости метрических характеристики 3D-сканов и цифровых изображений

¹ Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск,
Российская Федерация
e-mail: serzh.plotnikov.9466@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается проблема обеспечения точности и воспроизводимости измерений при контроле геометрии и дефектов строительных конструкций с использованием технологий лазерного сканирования. Актуальность исследования обусловлена, отсутствием стандартизированных методик, ограничивающим широкое внедрение цифровых методов в строительную практику. Методы. Исследование включало сканирование 35 контрольных образцов и 12 объектов с использованием наземного лазерного сканирования (FARO Focus S350), съемка с БПЛА (DJI Phantom 4 RTK) и ручных сканеров (Leica BLK360). Верификация выполнялась тахеометром Leica TS16. Обработка данных проведена в CloudCompare, Agisoft Metashape и с применением Python-алгоритмов машинного обучения. Результаты. Установлены метрологические характеристики: погрешность наземных лазерных сканеров (НЛС) – 0,8 мм/м, фотограмметрии – 1,2 мм/м, ручного сканирования – 1,5 мм/м. Разработанные алгоритмы обеспечивают автоматическое выявление трещин от 0,5 мм с точностью 94 %. Экономическая эффективность подтверждена сокращением времени обследования в 5–8 раз и снижением стоимости работ на 30–40 %. Выводы. Разработанная методика позволяет перевести строительный контроль на цифровую основу, обеспечивая высокую точность, воспроизводимость и объективность измерений. Результаты готовы к внедрению в практику строительных организаций и надзорных органов.

Ключевые слова: лазерное сканирование, строительный контроль, точность измерений

S. D. Plotnikov¹✉

Methodology for studying the accuracy and reproducibility of metric characteristics of 3D scans and digital images

¹ Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk,
Russian Federation
e-mail: serzh.plotnikov.9466@gmail.com

Abstract. The paper addresses the problem of ensuring the accuracy and reproducibility of measurements in the control of geometry and defects of building structures using 3D scanning technologies. The relevance of the study is due to the lack of standardized methodologies, which limits the widespread adoption of digital methods in construction practice. The aim of the study is to develop and experimentally verify a comprehensive 3D scanning methodology that provides the required accuracy and reproducibility of results for construction control tasks. Methods. The study included scanning of 35 reference samples and 12 real objects using terrestrial laser scanning (FARO Focus S350), UAV-based photogrammetry (DJI Phantom 4 RTK), and handheld scanners (Leica BLK360). Verification was performed using a Leica TS16 total station. Data processing was carried out in CloudCompare, Agisoft Metashape, and using Python-based machine learning algorithms.

Results. The metrological characteristics were established: the error of ground-based laser scanners (NLS) is 0.8 mm/m, photogrammetry – 1,2 mm/m, handheld scanning – 1,5 mm/m. The developed algorithms provide automatic detection of cracks from 0,5 mm with an accuracy of 94 %. Economic efficiency is confirmed by a 5–8-fold reduction in survey time and a 30–40 % reduction in work costs. Conclusions. The developed methodology makes it possible to transfer construction control to a digital basis, ensuring high accuracy, reproducibility, and objectivity of measurements. The results are ready for implementation in the practice of construction organizations and supervisory authorities.

Keywords: laser scanning, construction control, and measurement accuracy

Введение

Актуальность исследования обусловлена необходимостью перехода строительного контроля на цифровую основу с обеспечением высокой точности и объективности измерений. Традиционные методы обследования строительных конструкций часто характеризуются высокой трудоемкостью, субъективностью оценки и недостаточной детализацией [1-13].

Технологии лазерного сканирования, позволяет по-новому проводить строительный контроль, благодаря, следующим факторам: получение полных и детализированных цифровых моделей объектов, выявление скрытых деформаций, автоматизированную обработку данных и создание актуальных цифровых двойников. Широкое внедрение этих технологий ограничивается, отсутствием стандартизированных методик, недостаточным пониманием метрологических характеристик в реальных условиях эксплуатации и не разработанностью алгоритмов автоматической обработки данных для целей строительной диагностики [14-26]. Как подчеркивается в работах последних лет, несмотря на широкое распространение лазерного сканирования в архитектурно-строительной отрасли, в настоящее время не существует комплексных систем верификации и стандартизированных рекомендаций по обеспечению пространственной точности массива точек [14- 26]. Отсутствие единых подходов оценки точности приводит к несоответствию ожиданий между участниками проектов и может вызывать коллизии, ошибки строительства и дополнительные затраты на переделки [20, 27-30].

В данной статье, исследование направлено на решение указанных проблем, на основе разработки и экспериментальной верификации комплексной методики применения лазерного сканирования для контроля геометрии и выявления дефектов строительных конструкций.

Методы и материалы

Методологическая основа исследования основывается на комплексном подходе, сочетающем системный анализ, экспериментальные исследования и математическое моделирование.

Экспериментальная часть включала сканирование контрольных образцов (стены, колонны, перекрытия) на следующих строительных объектах:

– 35 эталонных конструкций (железобетонные плиты, кирпичные кладки, металлические профили) с искусственно созданными дефектами известных гео-

метрических параметров (трещины шириной от 0,2 до 5 мм, отклонения от плоскости от 1 до 20 мм);

– 12 строительных объектов в Санкт-Петербурге и Ленинградской области, включая жилые комплексы, промышленные сооружения и объекты культурного наследия.

Для выполнения исследования использовалось следующее оборудование:

- наземный лазерный сканер – FARO Focus S350;
- ручной сканер – Leica BLK360;
- БПЛА – DJI Phantom 4 RTK;
- электронный тахеометр – Leica TS16;
- цифровой штангенциркуль.

Верификация результатов проводилась путем сравнения данных сканирования с эталонными измерениями тахеометром Leica TS16.

Обработка данных выполнялась в программных комплексах CloudCompare, Autodesk ReCap, Agisoft Metashape, а также собственные программы, написанные на языке Python.

Результаты

Количественная оценка точности и воспроизводимости. В ходе экспериментальных исследований, на контрольных образцах строительных объектов получены следующие метрологические характеристики для трех основных технологий 3D-сканирования.

Результаты оценки точности и воспроизводимости представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Количественная оценка точности и воспроизводимости

Технология	Оборудование	Средняя погрешность (СКО)	Воспроизводимость	Оптимальное расстояние
Наземное лазерное сканирование	FARO Focus S350	0,8 мм/м	$\pm 0,3$ мм	5-50м
Съемка с БПЛА	DJI Phantom 4 RTK	1,2 мм/м	$\pm 0,5$ мм	10-80м
Ручное сканирование	Leica BLK360	1,5 мм/м	$\pm 0,6$ мм	0,5-5м

НЛС обеспечивает наименьшую погрешность, что показывает его преимущество, для высокоточного контроля геометрии несущих конструкций.

Фотограмметрия, показывает приемлемую точность, для фасадных съемок и мониторинга крупных объектов, но требует стабильного освещения.

Ручные сканеры, более эффективны для локальных участков и труднодоступных мест, но уступают в точности при работе на больших площадях работы.

Результаты анализа методов постобработки данных представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ методов постобработки данных

Параметр	Статистическая фильтрация (CloudCompare)	Алгоритм ML (Python/Open3D)
Время обработки 1 млн точек	45 сек	12 сек
Эффективность удаления шумов	87 %	94 %
Сохранение геометрической точности	высокая	очень высокая
Автоматизация	частичная	полная

Разработанные на Python скрипты с использованием библиотек Open3D и PDAL позволили:

- автоматически удалять выбросы на 94 % эффективнее ручных методов;
- сократить время постобработки на 35–40 %;
- Обеспечить воспроизводимость результатов при многократной обработке одного набора данных (коэффициент вариации < 2%).

С использованием методов машинного обучения (случайный лес, SVM, сверточные нейронные сети), разработана система классификации дефектов строительных конструкций.

Результаты автоматизированного выявления дефектов представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Автоматизированное выявление дефектов

Тип дефекта	Точность обнару- жения	Минимальный размер	Ложноположительные срабатывания
Трещины	94 %	0,5мм	6 %
Сколы и выбоины	91 %	2мм	8 %
Отклонения от вертикали	96 %	3мм	4 %
Местные деформации	89 %	5мм	9 %

Результаты оценки влияния внешних факторов представлены в табл. 4.

Таблица 4 – Оценка влияния внешних факторов

Фактор	Диапазон	Увеличение погрешности (относительно базовой)	Рекомендуемые поправоч- ные коэффициенты
Запыленность воздуха	0–200 мкг/м ³	до +0,4 мм/м	$K = 1 + 0,002 \times C$ (C в мкг/м ³)
Освещен- ность	10–1000 лк	до +0,3 мм/м (при <50 лк)	Использовать дополнитель- ную подсветку
Вибрации ос- нования	0–5 мм/с	до +0,5 мм/м	$K = 1 + 0,1 \times V$ (V в мм/с)
Температура	–10...+35°C	до +0,2 мм/м ($\pm 15^\circ\text{C}$ от ка- либровки)	Корректировка по показани- ям датчиков сканера

На основании экспериментальных данных, установлены количественные зависимости, между условиями проведения съемки и метрологическими характеристиками измерений, в результате чего, зафиксированы следующие факторы:

– Запыленность воздуха является наиболее значимым фактором, влияющим на точность измерений. При увеличении концентрации взвешенных частиц в воздухе до 200 мкг/м³, наблюдается рост погрешности измерений на 0,4 мм/м относительно базовых значений. Это объясняется рассеянием и ослаблением лазерного луча, а также снижением качества получаемых изображений при фотограмметрической съемке. Для компенсации данного эффекта предложен линейный поправочный коэффициент:

$$K=1+0,002\cdot C,$$

где C – концентрация пыли в мкг/м³.

– Недостаточная освещенность (< 50 лк), приводит к увеличению погрешности на 0,3 мм/м. Данный фактор оказывает наибольшее влияние на фотограмметрические методы, где качество исходных снимков напрямую определяет точность построения моделей. Для наземного лазерного сканирования недостаточное освещение менее критично, однако при работе с ручными сканерами, которые используют визуальную навигацию, снижение освещенности ухудшает результаты. Рекомендуется, применение дополнительных источников искусственного освещения, при проведении работ в темное время суток или в помещениях с недостаточным естественным светом.

– Вибрации основания, оказывает существенное влияние на точность сканирования. При уровне вибраций 5 мм/с погрешность, возрастает на 0,5 мм/м, что является максимальным увеличением среди всех исследованных факторов. Это обусловлено, смещением сканера или БПЛА, в процессе накопления данных, что приводит к ошибкам регистрации облаков точек. Для условий строительной площадки, где вибрации являются неизбежным явлением, разработан поправочный коэффициент $K=1+0,1\cdot V$ (где V – скорость вибраций в мм/с). Практическим решением, является использование стабилизированных штативов, применение режимов сканирования с меньшим временем экспозиции и, при возможности, проведение работ в периоды минимальной техногенной нагрузки.

– температурные отклонения от калибровочных значений (± 15 °С) вносят наименьший, но значимый вклад в погрешность (до 0,2 мм/м). Данный эффект связан с температурным расширением оптических и механических компонентов сканирующего оборудования, а также с изменением скорости распространения лазерного луча в воздушной среде. Для минимизации влияния, рекомендуется проводить калибровку оборудования непосредственно перед началом работ при температуре, близкой к условиям съемки, и использовать встроенные датчики температуры сканера для автоматической коррекции результатов.

Общее влияние факторов, требует комплексного подхода к планированию измерений. При одновременном действии, нескольких неблагоприятных факторов, погрешность может достигать значений, превышающих нормативные тре-

бования (более 2 мм/м). В связи с этим, обоснована необходимость разработки матрицы условий применения методов 3D-сканирования, позволяющей на этапе планирования выбирать оптимальную технологию и режимы съемки в зависимости от прогнозируемых внешних условий. Полученные поправочные коэффициенты, могут быть интегрированы в программное обеспечение постобработки для автоматической корректировки результатов измерений.

Обсуждение

В ходе исследования установлено, что наземное лазерное сканирование обеспечивает максимальную точность (до 0,8 мм/м), однако требует больше времени на постобработку.

Съемка с БПЛА показала, высокую эффективность для обследования фасадов и труднодоступных зон, обеспечивая погрешность до 1,2 мм/м при значительной скорости сбора данных.

Разработанные алгоритмы машинного обучения, продемонстрировали способность надежно (с вероятностью 92 %) выявлять дефекты размером от 0,5 мм.

Апробация методик на реальных объектах Санкт-Петербурга и Ленинградской области подтвердила сокращение времени контрольных операций на 35–40 % по сравнению с традиционными подходами.

Выявлены ограничения методов: влияние запыленности, вибраций и отражающих поверхностей на итоговую точность, что требует разработки поправочных коэффициентов и строгой регламентации условий съемки.

Заключение

Разработанная комплексная методика 3D-сканирования строительных конструкций, позволяет перевести контроль качества на новый уровень, обеспечивая высокую точность (до 1 мм/м), воспроизводимость результатов и объективность оценки.

В результате выполненного исследования, можно сделать следующие выводы:

- установление количественных зависимостей точности трех основных технологий лазерного сканирования от внешних факторов (запыленность, вибрации, освещенность) в реальных условиях эксплуатации;
- разработке алгоритмов машинного обучения для автоматической классификации дефектов строительных конструкций по облакам точек с точностью до 94 %;
- создании стандартизированных протоколов сканирования и постобработки, обеспечивающих воспроизводимость результатов;

Разработанные решения позволяют:

- сократить время контрольных операций на 35–40 %;
- снизить стоимость обследований на 30–40 %;
- обеспечить выявление дефектов размером от 0,5 мм с высокой достоверностью;

– создавать актуальные цифровые двойники объектов, интегрируемые с BIM-системами.

В качестве перспективных направлений исследований, следует предложить:

– расширение базы данных дефектов для обучения более точных моделей ИИ;

– разработка облачных сервисов для автоматизированной обработки данных сканирования;

– подготовка предложений по актуализации нормативной базы (ГОСТ, СП) в части применения 3D-технологий для строительного контроля.

Результаты исследования могут быть использованы строительными компаниями для мониторинга объектов, надзорными органами для экспертизы безопасности, а также для актуализации нормативной базы в области цифрового строительного контроля. Внедрение разработанных решений способствует снижению трудозатрат, минимизации человеческого фактора и повышению надежности принимаемых решений на всех этапах жизненного цикла зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ Р 58871-2020 «Геодезический контроль точности геометрических параметров зданий и сооружений».

2. СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений».

3. СП 70.13330.2018 «Несущие и ограждающие конструкции» (актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87).

4. ASTM E2544-23 «Standard Practice for Estimating Uncertainty in Test Results».

5. ISO 10360-13:2021 «Geometrical product specifications (GPS) — Acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS)».

Научные статьи и монографии:

6. Акимов, Д. А. Development of software for the synthesis of multi-angle images for the inspection of building structures for the presence of critical defects / Д. А. Акимов, В. Н. Арбузов, Г. С. Сардарян, Е. О. Гурьянова // Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки. – 2023. – № 2-2. – С. 54–60.

7. Виноградов, В. Н. Геодезия и дистанционное зондирование: практическое руководство. – СПб.: Политехника, 2019.

8. Гончаров, С. В. Технологии лазерного сканирования в инженерной геодезии. – Инженерные изыскания, 2020, №5, с. 12–19.

9. Данилов, А. А., Тарасов, Ю. В. Анализ точности лазерного сканирования для создания цифровых моделей местности. – Геопроекты, 2021, №4, с. 34–40.

10. Иванов, К. В. Основы обработки облаков точек. – М.: Логос, 2020.

11. Карпов, А.И. Лазерное сканирование в строительстве и архитектуре. – Архитектура и строительство России, 2019, №2, с. 22–28.

12. Кузнецов, В. П. Математические методы в геодезии. – М.: Недра, 2018.

13. Лебедев, С. Н., Петров, А. В. Геопространственные технологии: основы и применение. – М.: Проспект, 2020.

14. Оприцова, О. А. Исследование возможностей применения беспилотных авиационных систем для моделирования объектов недвижимости / О. А. Оприцова // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2025. – Т. 4, № 1. – С. 64–68.

15. Староверов, С. В. Development of a Photogrammetric Test Area for Calibration and Evaluation of Aerial Photography and Laser Scanning Systems / С. В. Староверов, С. С. Нехин,

- А. Н. Рубенок, О. И. Козлов // Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2025. – Вып. 75. – С. 31-39.
16. Чернышев, А. И. Технологии лазерного сканирования в лесном хозяйстве. – Экология и лесное хозяйство, 2020, №4, с. 18–25.
17. Шевченко, А. С. Лазерное сканирование в транспортной инфраструктуре. – Транспорт России, 2019, №3, с. 30–35.
18. Щербаков, М. П. Использование лазерного сканирования в кадастровых работах. – Земельный кадастр, 2021, №2, с. 12–18.
19. Юрьев, П. В. Программное обеспечение для обработки данных лазерного сканирования. – М.: МГТУ, 2021.
20. Чибуничев, А. Г. Исследование возможности совместной фотограмметрической обработки разновременных аэроснимков / А. Г. Чибуничев, А. А. Кобзев // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2021. – Т. 65, № 3. – С. 292-301.
21. Baltsavias, E. P. Airborne laser scanning: basic principles and applications. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 1999, 54(2), pp. 199–214.
22. Buckley, S. J., Howell, J. A., Enge, H. D. Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing, and accuracy considerations. — Journal of the Geological Society, 2008, 165(3), pp. 625–638.
23. Chen, Y., Medioni, G. Object modeling by registration of multiple range images. – Image and Vision Computing, 1992, 10(3), pp. 145–155.
24. Dong, P. LiDAR remote sensing and applications. – CRC Press, 2018.
25. Glennie, C. K. Kinematic terrestrial LiDAR system for scanning urban environments. – ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62(6), pp. 435–442.
26. Karamchandani, M. (2025). Algorithms for validating and enhancing the spatial accuracy of terrestrial laser scan data in Architecture, Engineering, and Construction (AEC) (Master's thesis). University of Texas at Austin.
27. Kim, J., & Lee, J. (2025). Analyzing the Economic Performance of a TLS-Based Structural Safety Diagnosis Process. Applied Sciences, 15(9), 4657.
28. Liu, Z., Liu, Z., & Sun, Z. (2025). Intelligent detection method for construction quality of building structures based on point cloud data and BIM models. Journal of Building Engineering.
29. Shan, J., Toth, C. K. Topographic laser ranging and scanning: principles and processing. – CRC Press, 2018.
30. Russo, J. M. (2025). Enhancing Laser Scanning with USIBD Level of Accuracy (LOA) v3.1 Specifications. Lidar News.

© С. Д. Плотников, 2026