



Экспериментальное исследование возможностей наземного лазерного сканирования для высокоточного мониторинга плановых смещений инженерных объектов

С.С. Жидяев¹ 

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

 zhidyayev09@gmail.com

цитирование Жидяев С.С. Экспериментальное исследование возможностей наземного лазерного сканирования для высокоточного мониторинга плановых смещений инженерных объектов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 29–51. DOI:10.30533/GiA-2026-002.

ключевые слова наземное лазерное сканирование, плановое смещение, мониторинг деформаций, облако точек, алгоритм обработки данных, точность измерений, мониторинг зданий, геодезический контроль

аннотация Современные методы геодезического мониторинга требуют высокой точности и оперативности при выявлении деформаций инженерных сооружений. В данной статье рассматривается применение метода наземного лазерного сканирования (НЛС) для определения плановых смещений объектов. Акцент сделан на экспериментальном исследовании точности метода. Работа базируется на экспериментальных данных, полученных при моделировании деформаций и анализе последовательных циклов наблюдений на основе облаков точек. Цель исследования — оценить возможности метода НЛС в выявлении малых смещений и определить точностные характеристики. В статье представлены методология обработки облаков точек и алгоритмы анализа данных, проведены эксперименты, демонстрирующие возможность высокоточной фиксации смещений, выявлены ограничения метода НЛС, обусловленные технической спецификой прибора, а также предложены возможные пути их минимизации. Результаты исследования подтверждают перспективность использования НЛС для высокоточного мониторинга сооружений, особенно в условиях плотной застройки, где классические методы могут оказаться менее эффективными. Практическая значимость работы заключается в возможности интеграции предложенного метода в систему мониторинга деформаций инженерных объектов, таких как здания, мосты и промышленные конструкции, что позволит повысить достоверность геодезических измерений и оперативно реагировать на критические изменения конструкции.

1 Введение

Одной из ключевых задач строительства при возведении зданий и сооружений является обеспечение их безопасности. В этом контексте геодезический мониторинг деформаций представляет собой неотъемлемый процесс на всех этапах жизненного цикла объектов капитального строительства — от разработки котлована до эксплуатации готового сооружения [1]. Своевременное получение данных о состоянии конструкций позволяет оперативно выявлять и предотвращать критические изменения, способные негативно повлиять на безопасность объекта и окружающей его среды [2]. Современные нормативные требования в области строительства становятся все более строгими, что делает геодезический мониторинг важным инструментом контроля [3].

Традиционные методы мониторинга в геодезии основаны на жестком закреплении наблюдаемых точек [4], что требует значительных подготовительных работ и может существенно осложнять процесс измерений [5]. Особенно это актуально на этапе активных строительных работ, когда доступ к контрольным точкам может быть затруднен [6]. В условиях плотной городской застройки [7], где значительная часть новых объектов возводится в стесненной среде [8–11], даже минимальные подвижки грунта или смещения несущих элементов могут привести к серьезным последствиям [12].

В связи с этим становится актуальным рассмотрение в качестве альтернативы традиционным бесконтактных методов наблюдения, способных существенно упростить процесс измерений [13]. В отличие от традиционных способов, предполагающих жесткое закрепление пунктов мониторинга с заданной плотностью в соответствии с требованиями нормативных документов, бесконтактный метод измерения позволяет получать данные без объемных подготовительных работ. Это особенно актуально при мониторинге крупных инженерных площадных сооружений, таких как плотины [14], дамбы [15, 16], резервуары [17], тоннели [18], где установка множества контрольных точек оказывается не только трудоемкой, но и менее эффективной [19]. Однако широкое внедрение таких методов сдерживается рядом факторов, включая вопросы точности, доступности технологий и отсутствие четких нормативных регламентов.

Одним из перспективных решений, способных изменить подход к геодезическому мониторингу деформаций, является метод наземного лазерного сканирования (НЛС). Этот метод позволяет с высокой точностью фиксировать пространственное положение объектов [20], создавать трехмерные модели и анализировать их изменения с течением времени. В отличие от традиционных методов, основанных на точечных измерениях [21], лазерное сканирование предоставляет объемные данные, что значительно расширяет возможности их анализа [22]. На сегодняшний день ни один регламентированный метод в геодезическом мониторинге не позволяет предоставлять информацию в таком виде. Кроме того, полученные в результате сканирования данные могут быть интегрированы в цифровые среды, такие как технологии информационного моделирования [23], что упрощает анализ и прогнозирование деформационных процессов.

Несмотря на очевидные преимущества, данный метод пока не включен в перечень технологий, рекомендованных нормативными документами для геодезического мониторинга [24]. Это ограничивает его широкое внедрение и требует обоснования его эффективности в научно-техническом контексте [25]. Исследование данных вопросов позволит не только решить актуальные задачи, но и разработать научно обоснованные методики применения лазерного сканирования в мониторинге деформаций, включая учет влияния внешних факторов и адаптацию метода к особенностям различных типов конструкций [26].

На сегодняшний день исследования в области применения НЛС для геодезического мониторинга деформаций находятся на этапе экспериментального обоснования [27, 28] и сравнительного анализа с традиционными методами [13]. Первоначальные исследования [29] показали, что данный метод позволяет получать данные с высокой детализацией и точностью, открывая новые перспективы для контроля деформаций в реальном времени. Однако остаются нерешенными вопросы, связанные с созданием алгоритмов обработки больших

массивов данных, а также стандартизацией метода в рамках нормативных требований.

В данной статье представлено экспериментальное исследование, направленное на изучение основных аспектов развития геодезического мониторинга, включая его интеграцию с цифровыми технологиями и потенциал использования методов НЛС. Исследование проведено с учетом ключевых факторов, таких как соответствие реальным условиям, практическая применимость, а также точность и надежность получаемых данных. Этап полевых измерений позволит оценить эффективность технологии в реальных условиях с учетом воздействия внешних факторов, а также определить трудоемкость ее практического внедрения. На этапе обработки и анализа данных основное внимание уделено оценке точности и надежности полученных результатов, их сопоставлению с современными нормативными требованиями, а также анализу адаптируемости метода к практическим задачам мониторинга. Дополнительно рассмотрены возможности адаптации современных программных решений к задачам геодезического мониторинга, проведена их оценка на предмет точности и корректности выполняемых расчетов в контексте решения актуальных задач мониторинга плановых деформаций.

2 Материалы и методы

Данное исследование посвящено геодезическому применению приборов НЛС для отслеживания и фиксации с субмиллиметровой точностью величин деформаций (геодезический мониторинг), а также выявлению возможностей, ограничений и факторов, влияющих на точность и достоверность данного метода при его использовании в задачах геодезического мониторинга инженерных сооружений. Особое внимание уделено анализу плановых деформаций, в частности горизонтальных смещений, т. к. именно они представляют одну из ключевых проблем при мониторинге устойчивости объектов в условиях плотной городской застройки.

В рамках эксперимента были выполнены многовариантные измерения, моделирующие различные условия и сценарии эксплуатации технологии. Исследование проводилось с использованием современных моделей НЛС от различных производителей, в частности приборов Trimble TX6, Leica P40 и Faro S150. Для проверки точности и воспроизводимости данных проведены пробные измерения на испытательном стенде, что подтверждается соответствующей фотофиксацией.

Экспериментальное исследование ориентировано на практическую оценку метода НЛС в условиях реальных геодезических задач. Полученные данные позволят определить потенциальные области применения технологии, выявить возможные ограничения и оценить ее интеграцию в процессы высокоточного мониторинга.

Исследование включало три этапа:

- 1) подготовительный (выбор оборудования, разработка методики эксперимента, подготовка испытательного стенда и программного обеспечения);
- 2) экспериментальный (проведение измерений в различных условиях, моделирование сценариев возможных деформаций, сбор данных с разных приборов);
- 3) аналитический (обработка и анализ полученных результатов, сравнение данных с нормативными требованиями и оценка возможности адаптации метода НЛС для геодезического мониторинга инженерных сооружений).

2.1 Подготовительный этап

Этап подготовительных работ заключается в подборе условий, позволяющих проверить гипотезу метода и раскрыть его максимальные возможности

Рис. 1 ✓

Внешний вид конструкций

Fig. 1

Appearance of constructions

Сборная система

Пластина



Тиски



Конструкция 1



Конструкция 2



при применении НЛС. Важно было создать условия, максимально приближенные к реальным, чтобы достоверно оценить эффективность метода при моделировании деформаций плановых смещений.

Процесс подготовки эксперимента включал разработку методики моделирования и выбор оборудования. Предыдущие исследования подтверждают возможность применения данного метода [29], однако для получения объективных результатов требовалось создать условия, обеспечивающие детальное изучение различных факторов, влияющих на точность измерений. В частности, эксперимент должен был включать анализ большого объема измерений.

Ключевыми факторами, определяющими условия эксперимента, стали:

- используемый наземный лазерный сканер;
- расстояние между прибором и исследуемой целью (расстояние до наблюдаемой цели);
- плотность (уровень) сканирования;
- количество измеренных (наблюдаемых) циклов;
- конструкции, обеспечивающие выполнение планового смещения с фиксированной эталонной величиной;
- вид моделируемых смещений.

Для моделирования плановых смещений были использованы конструкции двух типов, внешний вид которых представлен на рис. 1. Их собранная конфигурация и расположение в составе экспериментальной установки будут рассмотрены далее при описании схемы проведения эксперимента.

Первая конструкция представляет сборную систему приборного типа, которая состоит из двух закрепленных между собой площадок, осуществляющих движение перпендикулярно друг другу. Смещение задается с помощью микрометрического винта с точностью до 0,01 мм. Конструкция позволяет закрепить ее на тегере, а также фиксировать визирную цель с помощью усовершенствованных слесарных тисков. Выбор данной конструкции обусловлен тем, что в предыдущих исследованиях [29] уже проводились эксперименты с ее использованием, что позволило подтвердить ее надежность и применимость.

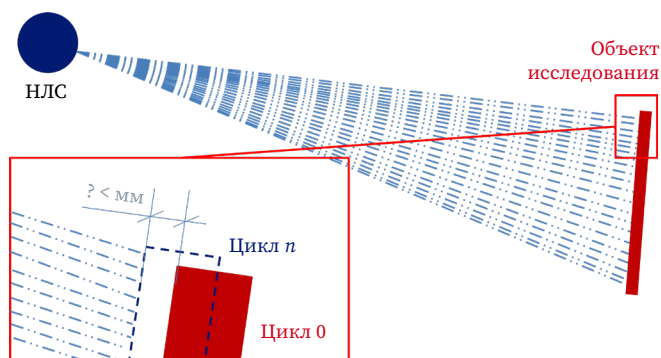
Вторая конструкция сборного вида состоит из алюминиевого каркаса, обшитого оргалитом и имеющего форму короба (параллелепипеда) размерами 100×30×100 см. В средней части лицевой стороны короба имеется сквозное отверстие размером 90×30 см, в которое встроен куб размером 30×30×30 см. Данная конфигурация позволяет моделировать деформации внутри изучаемого объекта, обеспечивая возможность движения куба вдоль и поперек отверстия. Выбор данной конструкции обусловлен тем, что поперечные смещения не удавалось корректно зафиксировать с использованием первой конструкции.

Рис. 2 ✓

Схема эксперимента по измерению деформаций методом НЛС (вид сверху)

Fig. 2

Scheme of displacement measurement using TLS (plan view)



2.2 Экспериментальный этап

Экспериментальное исследование заключалось в выявлении потенциальных возможностей прибора (наземного лазерного сканера) при моделировании плановых деформаций. Проведенные измерения позволили определить минимально фиксируемую величину, что представлено на рис. 2. На выноске отображен фрагмент сопоставления результатов сканирования на нулевом и n -м цикле, где зафиксировано смещение, характеризующееся малой амплитудой. Это позволяет оценить чувствительность метода и его пригодность для задач высокоточного мониторинга.

Реализация метода геодезического мониторинга при помощи НЛС осуществляется за счет избыточного количества измерений, по результатам которых возможно вычислить величину смещения наиболее надежно в результате детального анализа полученных данных. Проведенные измерения позволяют оценить точность фиксируемых деформаций с учетом характеристик различных приборов и условий наблюдений.

Рис. 3 ▼

Разложение вектора смещения на составляющие, связанные с позицией прибора (вид сверху)

Fig. 3

Decomposition of the displacement vector into components related to the instrument's position (plan view)

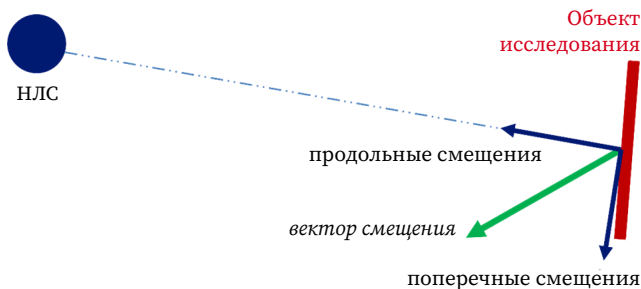
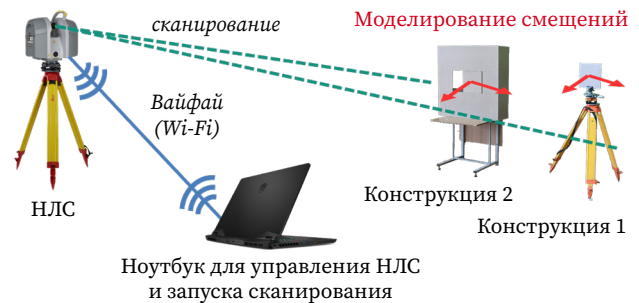
**Рис. 4** ▼

Схема проведения эксперимента: расположение прибора и комплектующих

Fig. 4

Experimental setup: instrument and components arrangement



Большинство геодезических приборов и реализуемые ими методы геодезического мониторинга плановых смещений имеют свою классификацию, зависящую от нескольких факторов: технических характеристик используемого прибора, методики наблюдений и ее точности¹. Выявление минимальных значений плановых смещений с последующей оценкой точности измерений и метода их применения позволяет представить потенциал в классификации данных приборов и используемого метода.

Плановые смещения по своему происхождению могут иметь различное направление, обусловленное воздействием нагрузочных факторов. При выполнении измерений определяемый вектор смещения, в свою очередь, зависит от положения прибора (его точки стояния). С учетом этого вектор планового смещения можно разложить на две составляющие: продольное и поперечное направления (рис. 3). Для всестороннего анализа и оценки чувствительности метода в рамках экспериментального исследования было принято решение рассматривать и моделировать оба типа смещений — как продольные, так и поперечные.

Процесс измерений представлял собой установку приборов и проведение серии сканирований с различными параметрами. В рамках эксперимента выполнено несколько этапов измерений, каждый из которых представлял собой серию отсканированных циклов. Величина шага смоделированных продольных и поперечных смещений составляла 1,0 мм.

Схема проведения этапа представлена на рис. 4. Все измерения осуществлялись в соответствии с условиями, определенными на подготовительном этапе. Исключались резкие изменения внешней среды, что обеспечивало стабильность результатов. Для устранения внешнего воздействия на устойчивость прибора и оценки возможностей использования дополнительных функций процесс измерений осуществлялся дистанционно.

По завершении подготовительных работ, включающих размещение объектов и установку прибора и конструкций в соответствии с запланированными условиями, этапы измерений проводились при статичном положении сканера. Управление прибором осуществлялось удаленно с использованием специализированного программного обеспечения через вайфай-соединение с ноутбуком, что обеспечивало постоянную устойчивость прибора к внешним воздействиям и стабильность измерений.

Последовательность действий была следующей: выполнялся цикл сканирования, затем цель вручную смещалась на заданный интервал, после чего сканирование повторялось. Такой подход позволял поэтапно моделировать плановые смещения, формируя набор облаков точек, включавший наблюдения из n циклов.

¹ ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2014. 22 с.

Таблица 1 
Условия проведенных этапов измерений

Table 1
Conditions of the measurement stages conducted

В рамках эксперимента проведено семь этапов измерений. Каждый этап представляет собой полный комплекс работ по наблюдению за деформациями в рамках геодезического мониторинга, включающий последовательность измерений, анализ точности данных и оценку стабильности результатов. Подробная информация по каждому этапу измерений со всеми условиями проведения эксперимента представлена в сводной табл. 1.

Этап	НЛС	Расстояние до цели, м	Расстояние между соседними точками (плотность сканирования), мм	Количество циклов	Используемая конструкция	Вид моделируемых смещений
I	Trimble TX6	31	22,6	5	1	Продольные
II	Trimble TX6	31	22,6	21	1	Продольные, поперечные
III	Trimble TX6	31	11,3	21	1, 2	Продольные, поперечные
IV	Trimble TX6	10	11,3	11	1	Продольные
V	Leica P40	81	11,3	12	1	Продольные
VI	Faro S150	14	4,4	5	1	Продольные
VII	Faro S150	21	3,1	13	1	Продольные

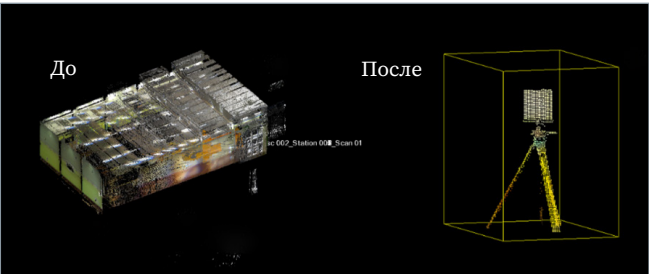
2.3 Аналитический этап

Процесс обработки результатов измерений выполняется поэтапно, что обеспечивает точность и корректность анализа данных. Каждый из этих этапов направлен на обеспечение достоверности полученных результатов и выявление закономерностей в поведении объекта исследования.

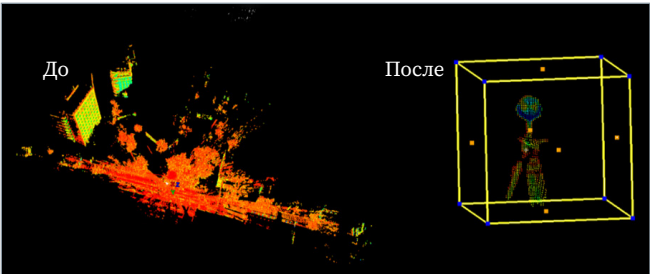
По результатам измерений полученные сырые данные импортируются в специализированное программное обеспечение (ПО) фирмы-производителя прибора, где проводится их предварительная обработка. На данном этапе выполняется локализация области исследования: с помощью инструментов ПО задается ограничительная рамка (рис. 5), которая позволяет выделить только зону наблюдения и исключить посторонние данные, не относящиеся к объекту исследования. Это повышает точность анализа и оптимизирует последующую обработку. На рис. 5 представлен результат данного процесса: из общего массива облака точек лазерного отражения (ТЛО) выделен фрагмент, соответствующий исследуемой области.

Рис. 5 
Результат локализации облака
Fig. 5
Result of point cloud localization

Trimble Business Center



Leica Cyclone



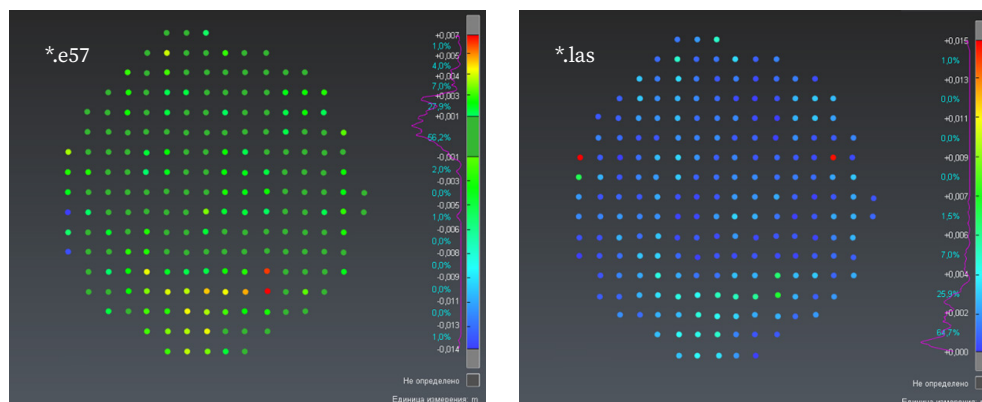
После выделения соответствующей зоны облако ТЛО экспортируется в формате *.e57, выбранном на основании исследований как оптимально подходящий для задач анализа данных. В ходе обработки было выявлено, что широко применяемый альтернативный формат *.las не содержит всех метаданных (атрибутов), фиксируемых прибором в процессе измерений, что ограничивает его применение в задачах деформационного анализа. Сравнительный анализ этих форматов представлен на рис. 6.

Рис. 6 ➔

Результат анализа данных при использовании форматов *.e57 и *.las

Fig. 6

Data analysis results using *.e57 and *.las formats



Импортированные данные анализируются в программном комплексе Leica Cyclone 3DR. На первом этапе выполняется предварительная обработка облаков ТЛО для минимизации влияния шумов на конечные результаты [30]. Шумом в данном контексте считаются отдельные точки, не соответствующие реальной поверхности объекта, возникающие в результате отражений от посторонних объектов, из-за атмосферных помех или особенностей сканирующего оборудования. Шум является одним из основных источников ошибок метода НЛС, влияя на точность измерений и последующий анализ деформаций [19]. Его высокий уровень может приводить к искажению геометрии объекта и снижению точности оценки смещений.

После устранения шумов и подготовки данных проводится сравнение циклов наблюдений методом «облако — облако» [31–33], который помогает выявить изменения в положении точек между циклами сканирования. В рамках эксперимента сравнение выполнялось между последовательными (например, 1–2, 2–3 и т. д.) и непоследовательными (например, 1–3, 3–5 и т. д.) циклами, что позволило оценить точность метода при различных величинах смещений и условиях наблюдения. Визуальная схема метода представлена в левой части рис. 7. Программное обеспечение формирует массив скалярных значений, соответствующих каждой точке облака, что дает возможность количественно оценить величину смещений. Полученные результаты сопровождаются визуализацией отклонений (правая часть рис. 7), что упрощает интерпретацию и последующий анализ данных.

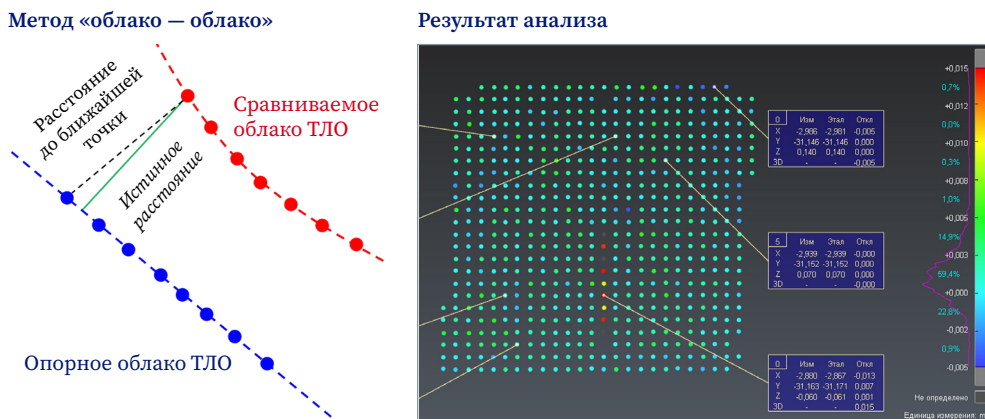
Такой формат представления данных не всегда удобен. В задачах мониторинга деформаций необходимо получить конкретное числовое значение смещения, характеризующего поведение поверхности объекта. Однако при сложной геометрии исследуемой поверхности при вычислении данной величины локальные смещения могут компенсировать друг друга, что затрудняет определение истинной величины деформации. Визуальная интерпретация интервалов смещений помогает оценить их распределение, но не дает точного количественного значения. Поэтому анализ отдельных областей обеспечивает более

Рис. 7 ➔

Процесс реализации метода «облако — облако» и визуальное представление результатов сравнения двух циклов

Fig. 7

Implementation of the cloud-to-cloud method and visual representation of two-cycle comparison results



точную оценку смещений и позволяет выявить критически важные зоны, где деформации могут превышать допустимые значения. Особенно актуально это в тех случаях, когда требуется детальный контроль состояния объекта и своевременное выявление потенциально опасных изменений.

Для получения надежных значений используется усреднение смещений на единицу площади однородной поверхности. Разделение поверхности на отдельные участки и усреднение значений внутри них повышает точность оценки и снижает влияние компенсирующих деформаций.

Применение методики усреднения обусловлено невозможностью прямого анализа деформаций на основе идентичных точек. В результате измерений в двух циклах методом НЛС невозможно однозначно определить пространственное положение одних и тех же точек в разных циклах, что исключает возможность их непосредственного сопоставления [34].

В данном эксперименте визирная цель представлена одной плоскостью, что позволяет определить итоговое смещение как среднее значение множества измерений в пределах этой поверхности. Такой подход обеспечивает более точное представление распределения деформаций по объекту и минимизирует погрешности, связанные с неоднородностью смещений.

После обработки данных результаты сравнения методом «облако — облако» для каждого цикла наблюдений экспортируются в текстовом формате *.txt. В файле содержатся числовые значения смещений, представленные в виде столбца, что упрощает дальнейший анализ. Величина смещения всего облака точек определяется как среднее арифметическое значений смещений:

$$1 \quad s_{k,m} = \frac{\sum_1^n s_i}{n},$$

где $s_{k,m}$ — среднее арифметическое значение смещений при сравнении циклов k и m ;

$\sum_1^n s_i$ — сумма смещений по результатам анализа циклов;

n — количество смещений.

Поскольку моделируемые смещения задавались с фиксированным шагом $-1,0$ мм, это значение смещения можно принять за истинное. Оценка точности измерений проводится по следующей формуле:

$$2 \quad m_{изм} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (s_i - S)^2}{n}},$$

где $m_{изм}$ — средняя квадратическая погрешность измерений;

s_i — значение смещения по результатам анализа цикла;

S — истинное значение смещения в циклах;

n — количество отклонений от истины.

Завершающей стадией анализа является оценка точности применяемого метода, которая выполняется по аналогичной формуле, но с использованием уже вычисленных средних значений смещений облака данных двух последовательных циклов и непоследовательных циклов:

$$3 \quad m_{метод} = \sqrt{\frac{\sum_1^n (s_{k,m} - S)^2}{n}},$$

где $m_{метод}$ — средняя квадратическая погрешность метода;

n — количество пар сравненных циклов.

Поскольку анализ смещений между циклами требует обработки большого объема данных, процесс вычислений был автоматизирован. Для этого разработана программа на языке Python, обрабатывающая экспортированные из специализированного ПО текстовые файлы, содержащие результаты сравнения циклов (значения смещений между двумя циклами), и выполняющая расчет ключевых параметров. Такой подход позволил ускорить анализ и вычисления, а также минимизировать вероятность ошибок.

В процессе обработки рассчитываются средние значения смещений, оцениваются точность измерений и достоверность полученных результатов, как показано на рис. 8. Выходные данные — номера сравниваемых циклов,

заданное (моделируемое) значение смещения, вычисленное среднее значение и среднеквадратическая погрешность (СКП) — представлены в левом нижнем углу рисунка.

Для наглядного представления результатов строится гистограмма распределения смещений (рис. 8). По оси абсцисс отложены значения смещений (в миллиметрах), по оси ординат — относительная частота их появления. Поверх гистограммы отображается кривая нормального распределения, аппроксимирующая полученные данные, что позволяет визуальнo оценить характер и симметричность вариаций. Вертикальная пунктирная линия указывает на среднее значение, а в правом верхнем углу графика дополнительно приводятся численные значения среднего смещения и СКП.

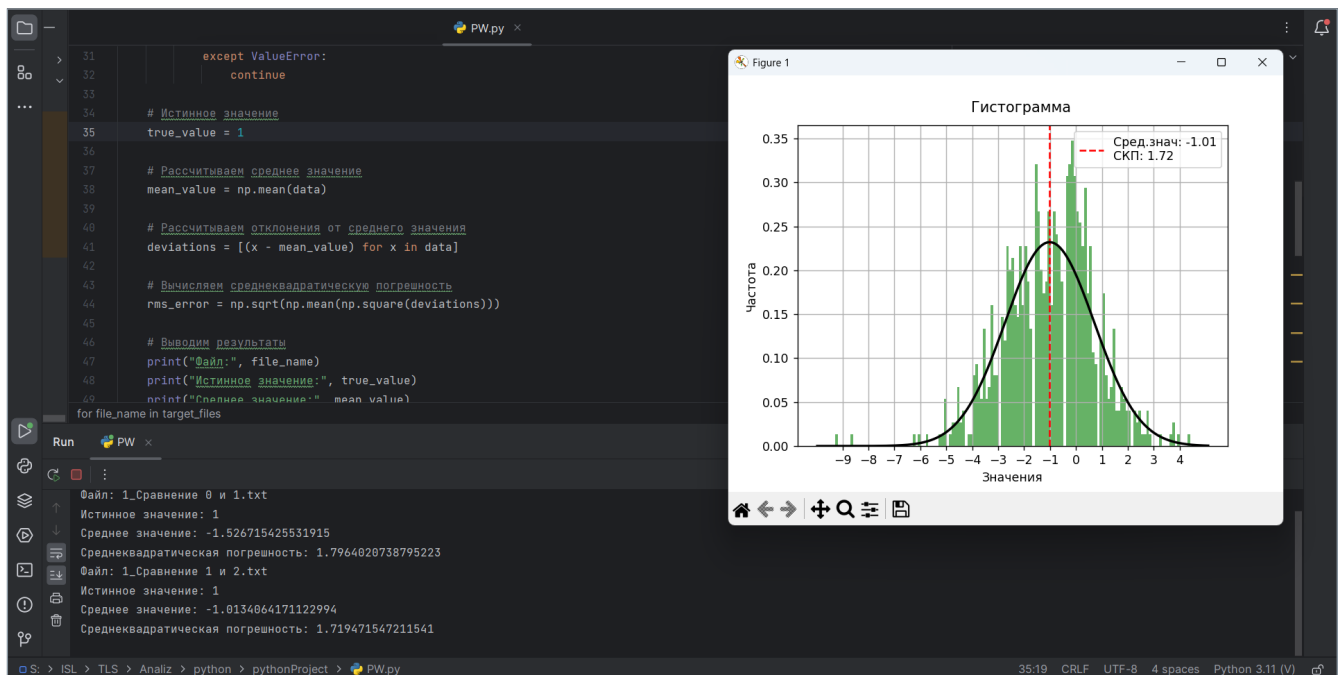
Представленный способ визуализации упрощает интерпретацию результатов, позволяет быстро оценить характер распределения смещений и сделать предварительные выводы о точности измерений.

Рис. 8

Представление результата обработки массива данных этапа измерений

Fig. 8

Representation of processed measurement data



3 Результаты и обсуждение

В данном разделе приведены результаты анализа продольных и поперечных смещений, полученные в ходе эксперимента. Схема, иллюстрирующая принцип определения этих смещений, представлена на рис. 3. Измерения проводились на основе условий, указанных в табл. 1. По каждому этапу вычислены средние значения смещений между последовательными и непоследовательными циклами наблюдений, а также выполнена оценка точности измерений и используемого метода. Для наглядности данные представлены в виде гистограмм и диаграмм, что позволяет проследить динамику смещений и оценить стабильность методики.

3.1 Анализ продольных смещений

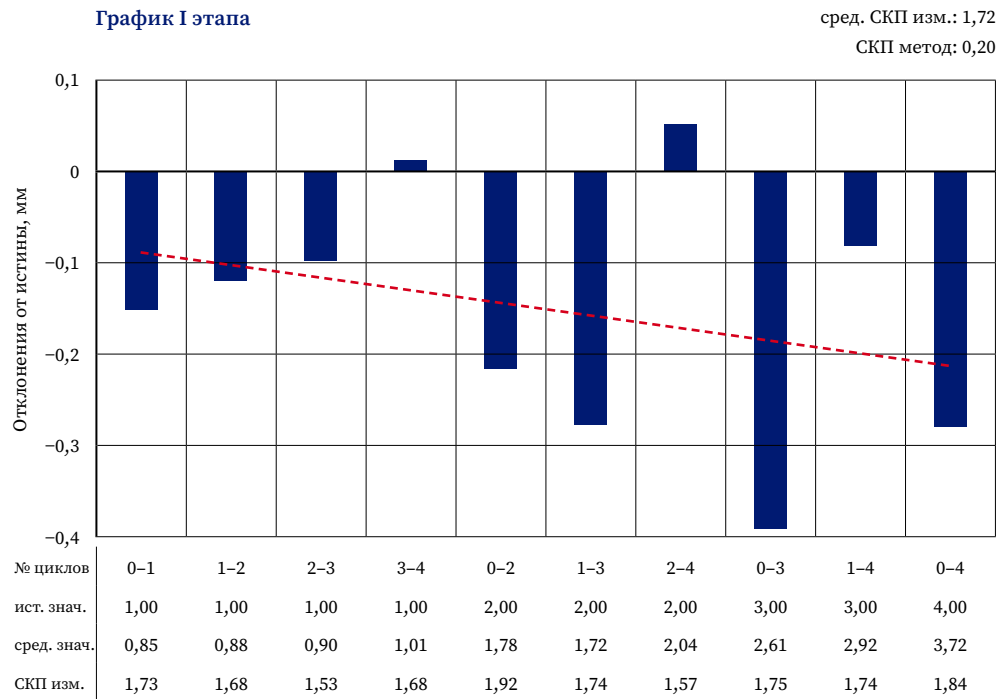
Фиксация продольных смещений производилась на каждом этапе измерений. Результаты первого этапа, представленные на рис. 9, демонстрируют, что фиксируемые смещения соответствуют заданным значениям. Это подтверждает работоспособность методики и стабильность условий эксперимента. Данные

Рис. 9

Результаты анализа первого этапа сравнения продольных циклов

Fig. 9

Results of the first stage analysis of longitudinal cycle comparison



выводы послужили основанием для перехода ко второму этапу, в рамках которого дополнительно оценивалась возможность фиксации меньших интервалов.

На втором этапе, наряду с повторным анализом смещений с шагом 1 мм, было проведено дополнительное исследование, направленное на оценку возможности фиксации более малых смещений. С учетом высокой точности регистрации смещений на первом этапе часть циклов выполнялась с интервалом 0,5 мм. Результаты анализа на рис. 10 показывают, что прибор фиксирует такие малые смещения с высокой точностью.

По результатам анализа второго этапа, представленного на диаграмме (рис. 11), наблюдается значительное отклонение одной из последовательных пар циклов от истинного значения, достигающее почти половины величины смещения. Это отклонение оказывает влияние на анализ непоследовательных пар циклов, искажая общую оценку смещений.

Рис. 10

Гистограмма распределения смещений

Fig. 10

Histogram of displacement distribution

Условные обозначения
- - - среднее значение — 0,51
СКП — 1,90

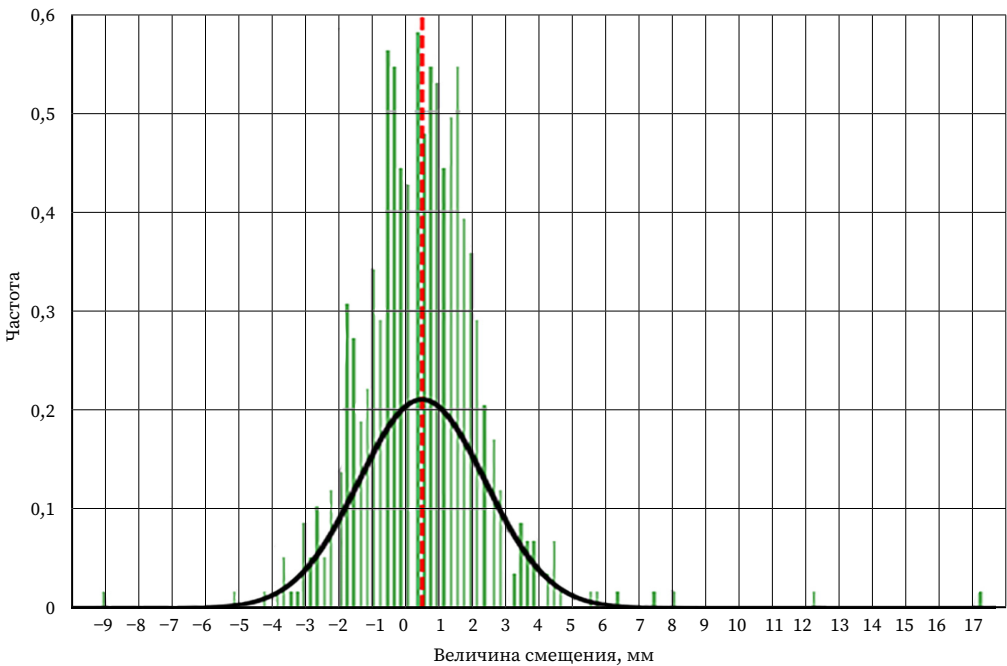
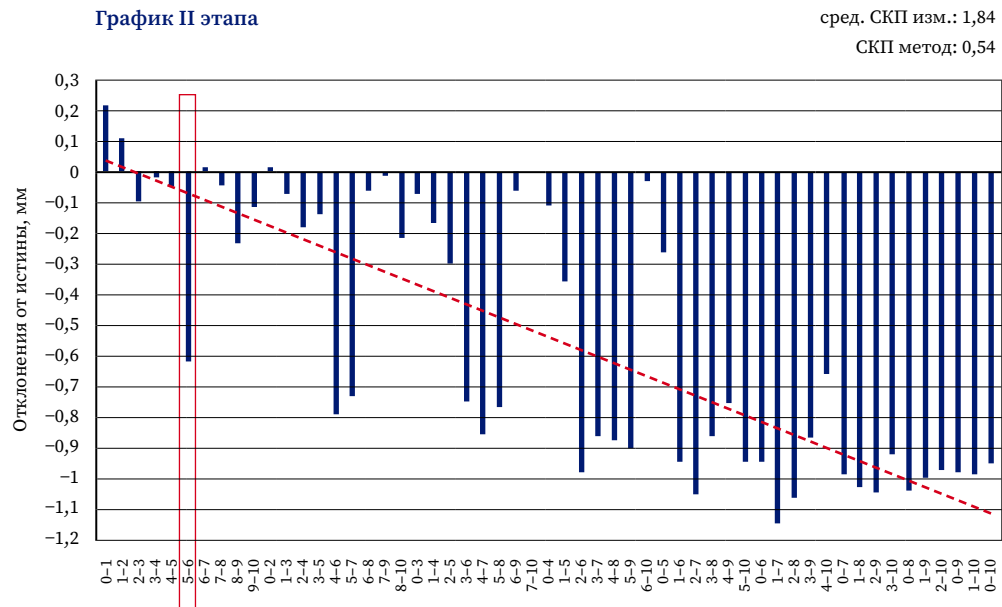


Рис. 11 ➔
Результаты анализа второго
этапа продольных циклов
Fig. 11
Results of the second stage
analysis of longitudinal cycles



Поскольку регистрация смещений величиной 0,5 мм подтверждена, можно предположить, что выявленное отклонение обусловлено грубой ошибкой, вероятно связанной с нестабильностью движения платформы конструкции. Для минимизации данного влияния из набора данных были исключены пары циклов, содержащие проблемный интервал. Анализ скорректированных данных, представленных на рис. 12–13, показал, что после исключения аномального участка результаты соответствуют данным первого этапа, подтверждая стабильность метода.

Последующие этапы измерений (III–VII) были направлены на дополнительную проверку точности метода. Были изменены условия наблюдений (из важных основных — расстояние до наблюдаемой цели, используемая модель прибора). Результаты анализа продольных смещений на каждом этапе представлены на рис. 14–18.

Рис. 12 ➔
Результаты анализа второго
этапа последовательных
продольных циклов после
исключения аномального
промежутка
Fig. 12
Results of the second stage
analysis of sequential longitudinal
cycles after excluding
the anomalous interval

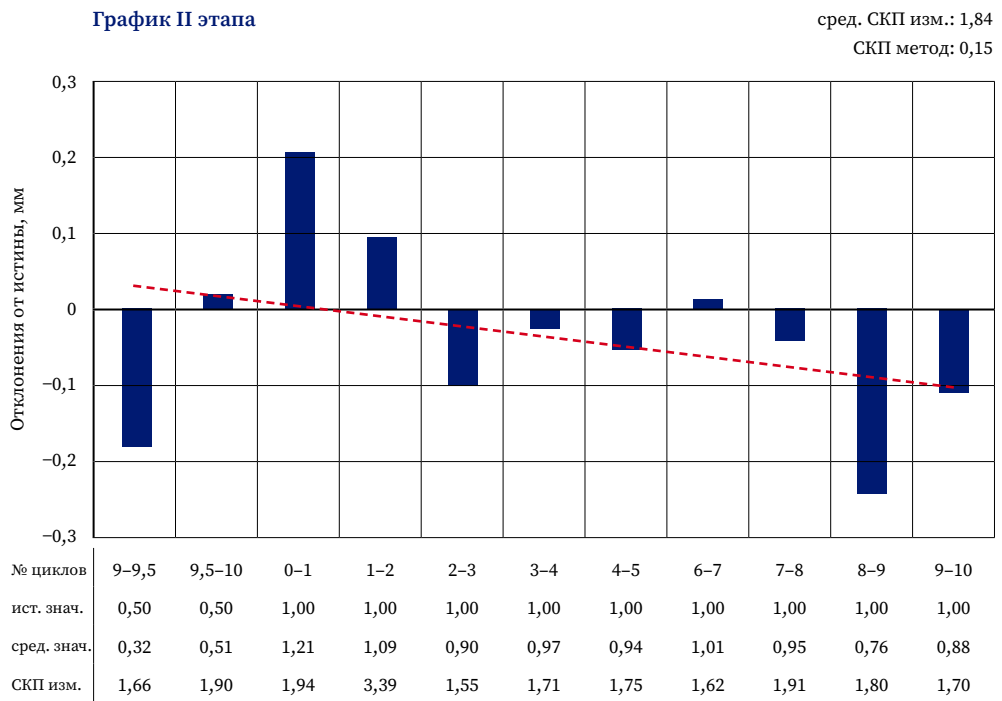


Рис. 13 ➡

Результат анализа второго этапа продольных циклов после исключения аномального промежутка

Fig. 13

Results of the second stage analysis of longitudinal cycles after excluding the anomalous interval

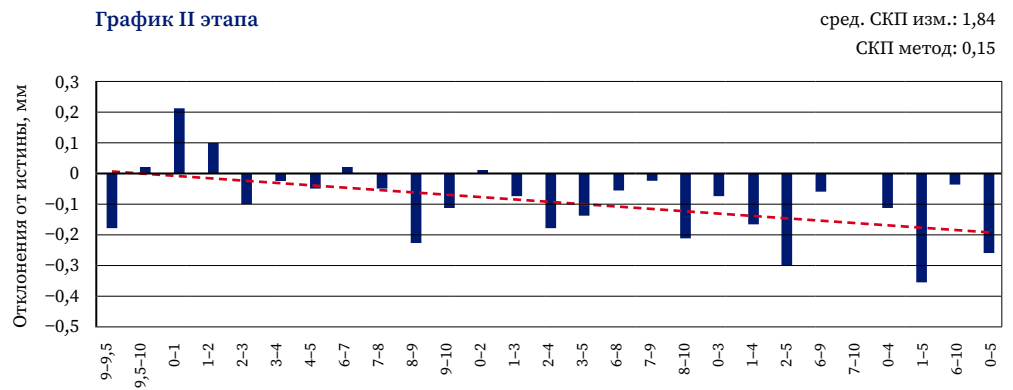


Рис. 14 ➡

Результаты анализа третьего этапа последовательных продольных циклов

Fig. 14

Results of the third stage analysis of sequential longitudinal cycles

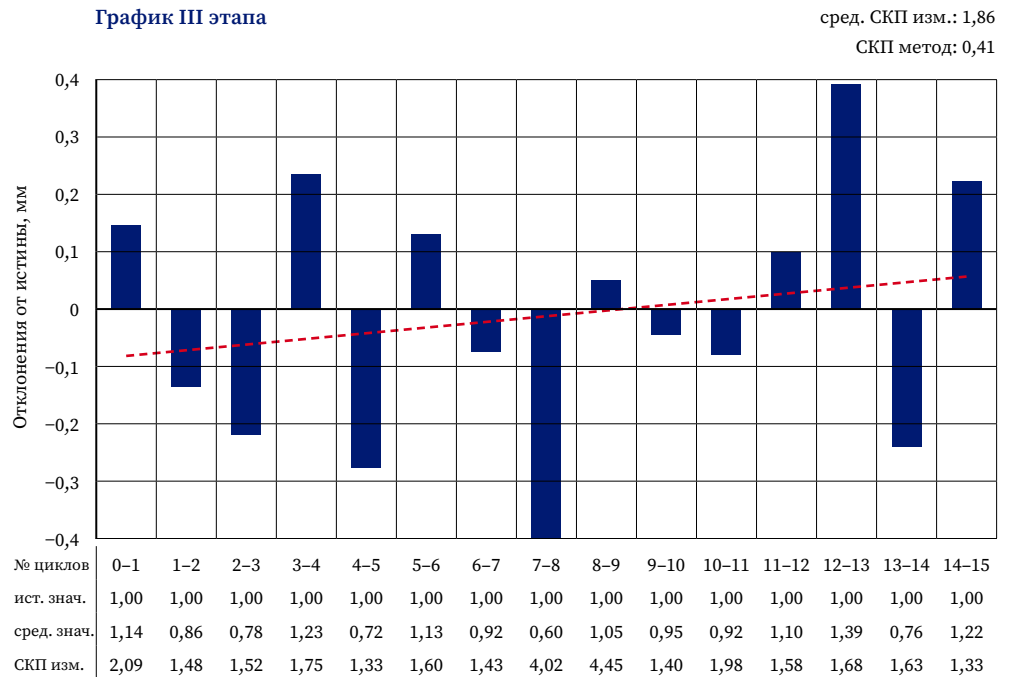


Рис. 15 ➡

Результаты анализа четвертого этапа последовательных продольных циклов

Fig. 15

Results of the fourth stage analysis of sequential longitudinal cycles

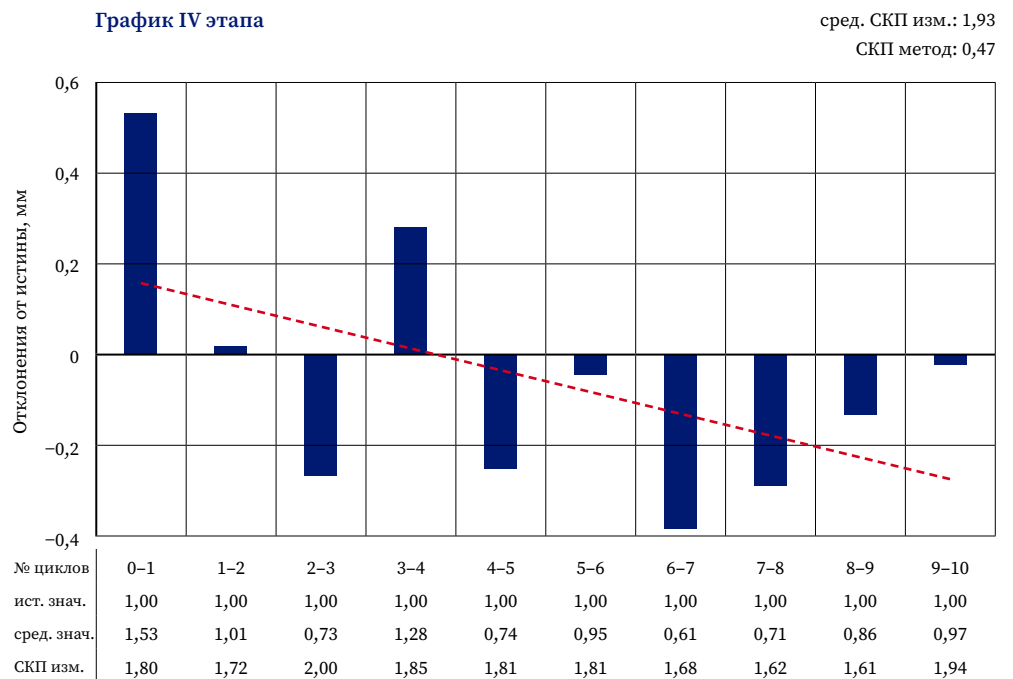


Рис. 16 ➡

Результаты анализа пятого
этапа сравнения продольных
циклов

Fig. 16

Results of the fifth stage analysis
of longitudinal cycle comparison

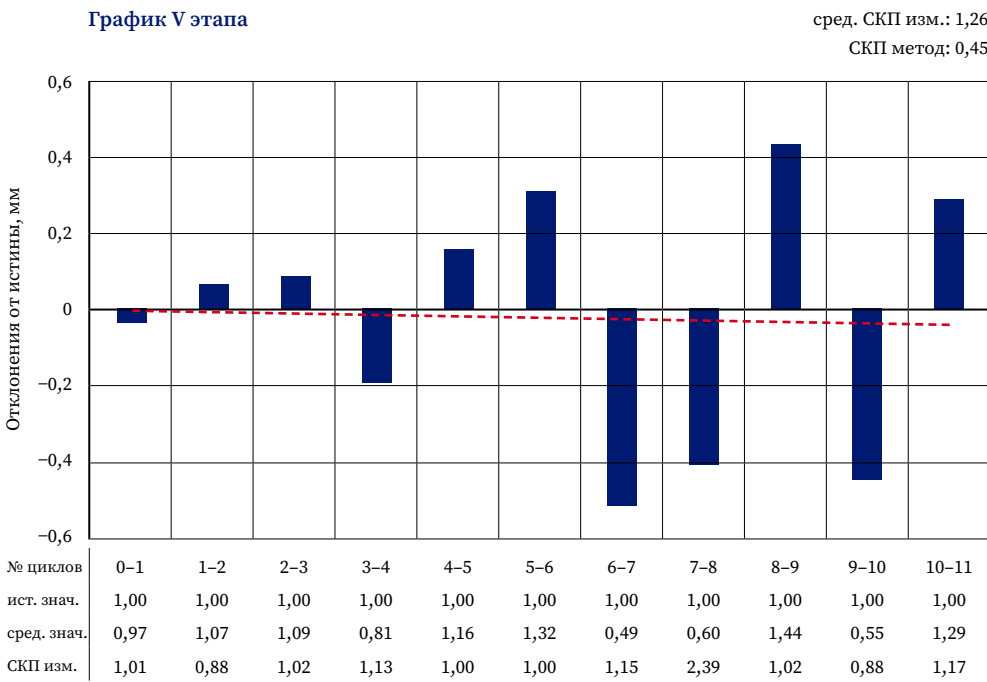


Рис. 17 ➡

Результаты анализа шестого
этапа сравнения продольных
циклов

Fig. 17

Results of the sixth stage analysis
of longitudinal cycle comparison

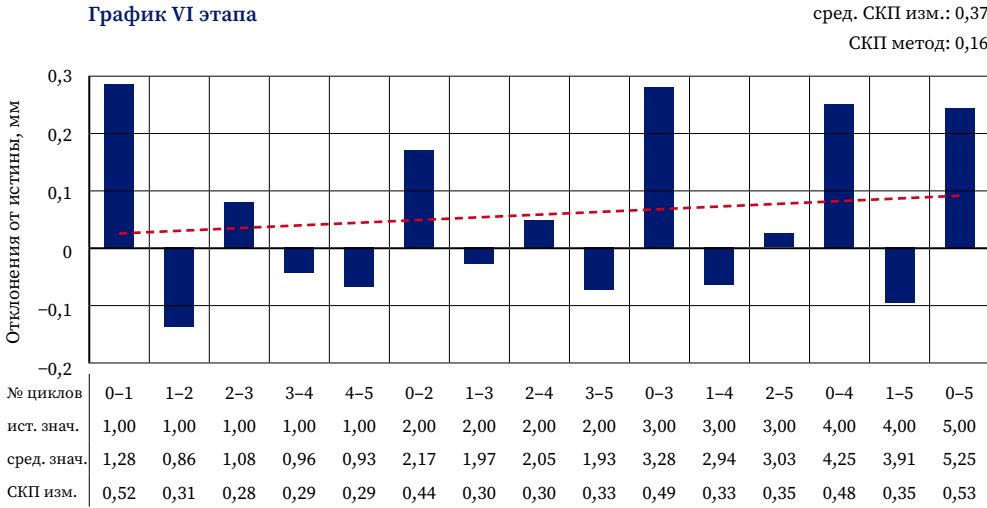
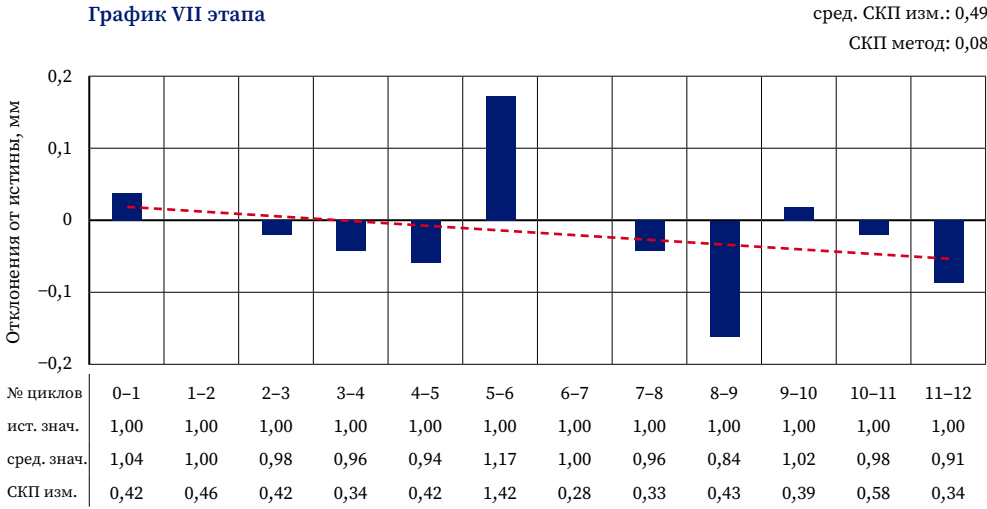


Рис. 18 ➡

Результаты анализа седьмого
этапа последовательных
продольных циклов

Fig. 18

Results of the seventh stage
analysis of sequential longitudinal
cycles



Для обобщенной оценки точности метода вычислены средние значения СКП измерений и самого метода. Итоговые данные сведены в табл. 2.

Таблица 2 
Результаты анализа продольных смещений по каждому этапу
Table 2
Results of the analysis of longitudinal displacements for each stage

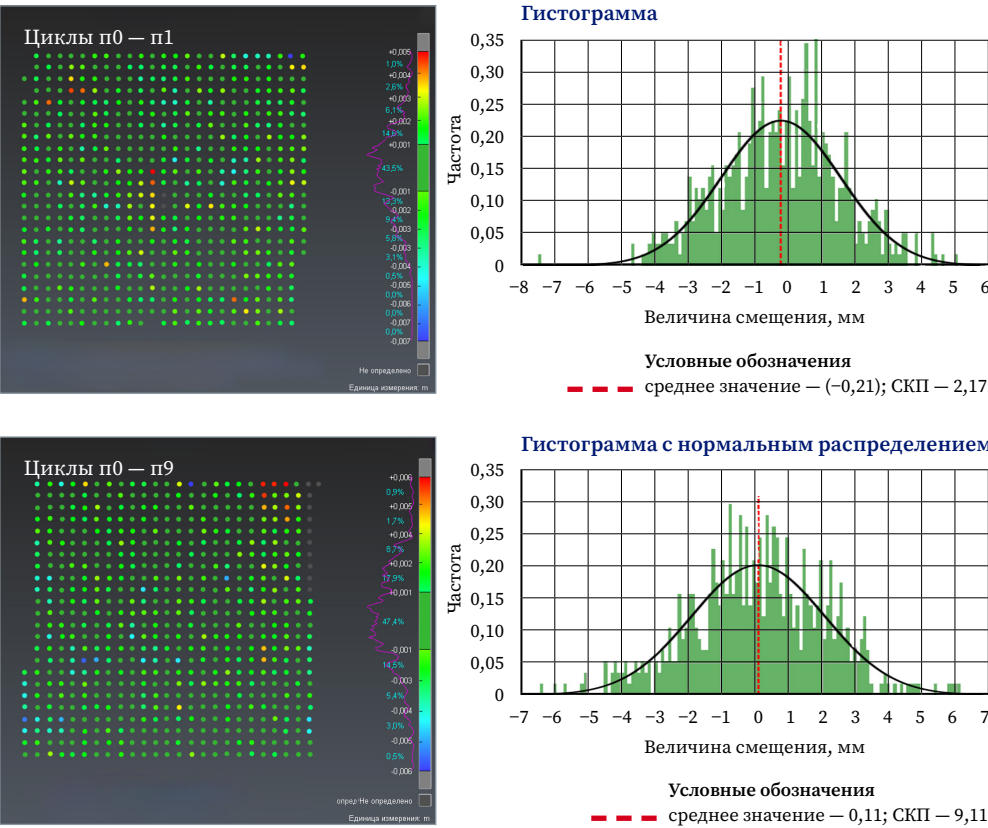
Этап	Среднее значение СКП измерений $m_{\text{сред.изм}}$, мм	СКП метода $m_{\text{метод}}$, мм
I	1,72	0,20
II	1,84	0,15
III	1,86	0,41
IV	1,93	0,47
V	1,26	0,45
VI	0,37	0,16
VII	0,53	0,09

3.2 Анализ поперечных смещений

Измерение поперечных смещений проводилось на втором и третьем этапах эксперимента. На втором этапе анализ поперечных смещений показал, что при сравнении последовательных циклов (а также начального и конечного) величина поперечных смещений равна нулю, что указывает на неспособность метода выявить поперечные смещения.

Поскольку движение наблюдаемой цели происходило исключительно в поперечном направлении относительно НЛС, данный результат подтверждает неизменность наблюдаемой цели в продольном направлении, что отражают гистограммы, представленные на рис. 19. Небольшие отклонения от нулевого значения объясняются различными погрешностями измерений, основным источником которых является шум. Таким образом, полученные результаты указывают на то, что алгоритмы обработки данных методом «облако — облако», используемые в ПО, не позволяют зафиксировать поперечные смещения в явном виде.

Рис. 19 
Результат анализа поперечных смещений второго этапа
Fig. 19
Result of the second stage transverse displacement analysis



На третьем этапе была предпринята попытка выявления поперечных смещений при иных условиях, т. к. на предыдущем этапе их регистрация оказалась невозможной. В связи с этим была выдвинута гипотеза о том, что алгоритмы ПО не могут корректно определить границы облаков точек при их сравнении, и это препятствует фиксации поперечных смещений. Для проверки гипотезы предложено использовать опорные участки, положение точек которых остается неизменным во время измерений, тогда как деформации происходят внутри исследуемого объекта [35]. Такая конфигурация была реализована с помощью конструкции 2, представляющей собой стенд, моделирующий деформации внутри исследуемого объекта.

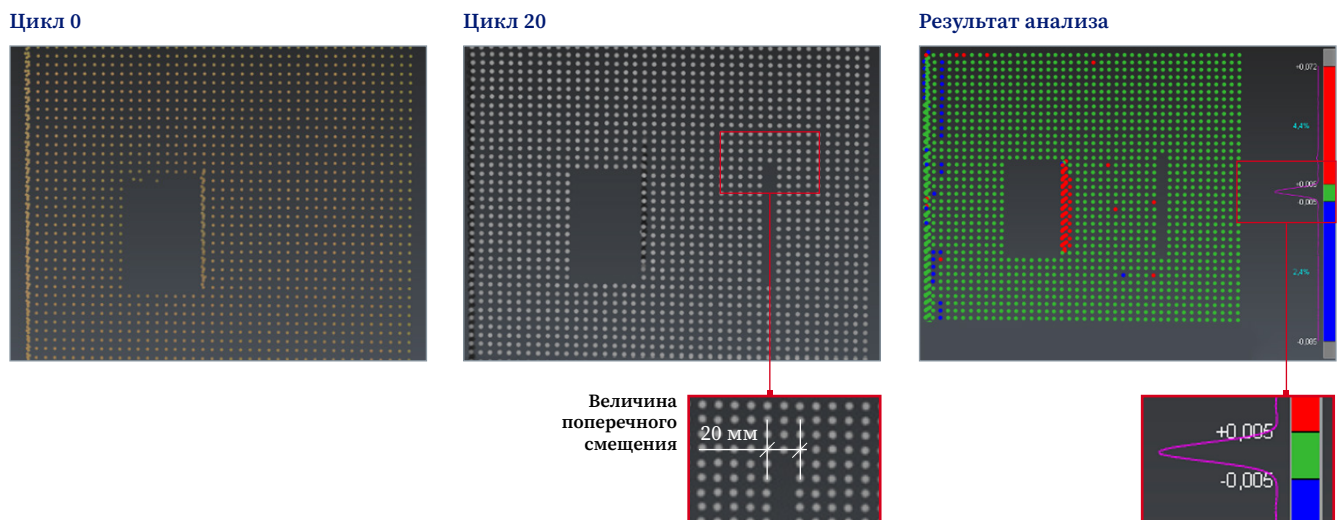
Результаты анализа показали, что, несмотря на наличие опорных участков, метод сравнения «облако — облако» не позволяет явно зафиксировать поперечные смещения. Это подтверждается как данными диаграммы, так и визуальным анализом результатов. На рис. 20 представлены облака точек для циклов 0 и 20, а также результат их сравнения. Основная масса точек, включая как опорные, так и деформируемые участки, окрашена в зеленый цвет, что соответствует смещениям, близким к нулю, указывая на отсутствие поперечного смещения. Тем не менее при визуальном рассмотрении модели отчетливо прослеживается щель внутри объекта, указывающая на наличие поперечного смещения, не отраженного в численных результатах.

Рис. 20 ▼

Результат анализа поперечных смещений третьего этапа

Fig. 20

Result of the third stage transverse displacement analysis



Таким образом, даже при использовании опорных участков с неизменным положением точек проблема корректного выявления поперечных смещений остается нерешенной. Это указывает на ограниченность метода «облако — облако» в условиях поперечных деформаций, вероятно обусловленную невозможностью однозначной фиксации границы исследуемого объекта. Указанное ограничение свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования методики анализа.

4 Выводы

Проведенное исследование продемонстрировало эффективность применения метода НЛС для определения плановых смещений объектов. Анализ результатов позволил не только подтвердить работоспособность метода, но и выявить его особенности, определить точность, а также оценить влияние условий измерений на полученные данные.

Важным аспектом исследования стала ориентация вектора деформации относительно положения прибора, что позволило разложить плановые смещения на продольную и поперечную составляющие. Это дало возможность провести

более детальный анализ особенности метода и его эффективности в зависимости от направления смещений. Анализ продольных смещений подтвердил высокую точность фиксации: среднеквадратическая ошибка их определения составила 0,3 мм, что значительно превосходит допустимую погрешность² измерений горизонтальных смещений I класса — 2 мм. Такой результат подтверждает высокий потенциал метода для задач геодезического мониторинга.

В то же время выявлена ключевая проблема — невозможность корректного выявления поперечных смещений. Несмотря на наличие фактических изменений в положении объекта, современные алгоритмы анализа облаков точек их явно не фиксируют. Предположение о влиянии неопределенности границ облаков точек подтвердилось: даже при наличии опорных участков с неизменным положением результаты анализа оставались такими же. Это указывает на ограниченность метода сравнения «облако — облако» при анализе поперечных деформаций и подчеркивает необходимость разработки новых алгоритмов, способных учитывать особенности такого рода смещений.

Достигнутая точность метода определяется рядом факторов, включая направление приложенной нагрузки, вектор смещения конструкции, положение прибора, расстояние до объекта и плотность сканирования. Установлено, что точность определения деформаций напрямую связана с плотностью точек на единицу площади, а значит, с расстоянием до объекта: с его увеличением плотность точек уменьшается, что негативно сказывается на точности фиксации смещений. Важно также отметить, что при изменении положения сканера между циклами сканирования возникает ошибка взаимной ориентации облаков точек, способная повлиять на точность оценки деформаций. Влияние этой погрешности на результаты анализа представляет собой отдельную исследовательскую задачу и требует дальнейшего изучения. В рамках настоящего исследования положение сканера оставалось неизменным, что позволило исключить влияние данной ошибки. В связи с этим для получения сопоставимых по качеству результатов при практическом применении метода рекомендуется сохранять фиксированное положение сканера между циклами сканирования.

В геодезическом мониторинге каждый класс точности имеет регламентированные требования к допустимой погрешности измерений, поэтому возникает задача количественного определения соответствующей заданному классу зависимости между плотностью точек и расстоянием до объекта. Установление такой зависимости позволит заранее рассчитывать требуемую плотность сканирования, адаптируя методику под конкретные условия мониторинга. Это повысит практическую применимость метода и обеспечит достижение требуемой точности при оптимальных параметрах съемки.

Метод НЛС обладает высоким потенциалом в геодезическом мониторинге, особенно при контроле деформаций в замкнутых пространствах — тоннелях метро, котлованах, подземных переходах и других инженерных сооружениях. В таких условиях можно обеспечить стабильное положение прибора и высокую плотность сканирования, что особенно важно для точной фиксации смещений. Внутренний замкнутый контур объекта обеспечивает преимущество: смещения, как правило, имеют продольный характер, что упрощает интерпретацию результатов и исключает необходимость разложения вектора деформаций на компоненты.

В то же время метод может быть успешно адаптирован и для мониторинга объектов с внешним контуром — при условии, что сканирование выполняется с нескольких сторон, обеспечивая полное перекрытие поверхности. Такой подход позволяет эффективно учитывать сложные случаи деформаций, включая поперечные и комбинированные смещения, тем самым расширяя применимость метода в различных условиях и повышая его универсальность.

² ГОСТ 24846-2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. М.: Стандартинформ, 2014. 22 с.

библиография

1. Кирюникова Н.М., Лесовая Н.М., Гура Д.А. Геодезический мониторинг как средство наблюдения за состоянием объектов инфраструктуры // Современные проблемы и перспективы развития земельно-имущественных отношений: сборник статей по материалам II Всероссийской научно-практической конференции. Краснодар: КубГАУ, 2020. С. 390–395.
2. Ханнанов Р.Р., Михнев А.В. Геодезический мониторинг состояния ограждающей дамбы № 1 золотвала ТОО «ГРЭС Топар» по методике наземного лазерного сканирования // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Международный научный конгресс: сборник материалов в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2022. Т. 1. С. 13–18. DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-13-18.
3. Галиев И.Х., Ибрагимов Р.А., Ашрапов А.Х. Возможности 3D сканеров при мониторинге реконструируемых зданий // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы IV Международной научно-практической конференции (21–23 апреля 2021 г.). СПб.: СПбГАСУ, 2021. С. 274–281. DOI:10.23968/BIMAC.2021.035.
4. Wu C., Yuan Y., Tang Y., et al. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry // Sensors. 2022. Vol. 22. Iss. 1. P. 265. DOI:10.3390/s22010265.
5. Ханнанов Р.Р. Лазерное сканирование для определения деформаций насыпных дамб // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIX Международный научный конгресс: сборник материалов в 8 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2023. Т. 1, № 1. С. 149–153. DOI:10.33764/2618-981X-2023-1-1-149-153.
6. Шоломицкий А.А., Лагутина Е.К., Соболева Е.Л. Применение лазерного сканирования для мониторинга большепролетных сооружений // Вестник СГУГиТ. 2018. Т. 23, № 2. С. 43–57.
7. Мурсалимова Э.А., Бажирова Г.К., Сейтказы А.К. Геодезический контроль процесса деформации высотных сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования // The Scientific Heritage. 2022. № 101. С. 28–34. DOI:10.5281/zenodo.7340757.
8. Васильева М.Д. Проблема строительства в стесненных условиях городской среды (застройки) // Инновационные методы организации строительного производства: материалы II Всероссийской научно-практической конференции (17–18 ноября 2022 г.). СПб.: СПбГАСУ, 2023. С. 78–84.
9. Мамченков В.Д. Особенности строительства в условиях плотной городской застройки // Молодой ученый. 2023. № 46 (493). С. 44–47. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/493/107716> (дата обращения: 23.02.2025).
10. Филь О.А., Шаповалов С.И., Касимов А.О. Организация строительства в стесненных условиях жилого дома // Инженерный вестник Дона. 2019. № 1 (52). С. 150. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5590> (дата обращения: 23.02.2025).
11. Чередниченко Т.Ф., Тухарели В.Д., Снегирев Д.П. Направленность современного строительства — застройка городов в стесненных условиях // Инженерный вестник Дона. 2018. № 1 (48). С. 145. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4743> (дата обращения: 23.02.2025).
12. Акопян Г.Т., Кирюникова Н.М., Лесовая Э.Д. и др. Опыт использования ПО Cyclone для моделирования и определения смещения объекта в пространстве // Научные труды КубГТУ. 2020. № 8. С. 932–941. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0081/4130.pdf> (дата обращения: 23.02.2025).
13. Zhou Y., Zhu J., Zhao L., et al. High-Precision Monitoring Method for Bridge Deformation Measurement and Error Analysis Based on Terrestrial Laser Scanning // Remote Sensing. 2024. Vol. 16. Iss. 13. P. 2263. DOI:10.3390/rs16132263.
14. Xu H., Li H., Yang X., et al. Integration of Terrestrial Laser Scanning and NURBS Modeling for the Deformation Monitoring of an Earth-Rock Dam // Sensors. 2019. Vol. 19. Iss. 1. P. 22. DOI:10.3390/s19010022.
15. 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. DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-2-31-40.

16. Seo H. Tilt Mapping for Zigzag-Shaped Concrete Panel in Retaining Structure Using Terrestrial Laser Scanning // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2021. Vol. 11. P. 851–865. DOI:10.1007/s13349-021-00484-x.
17. Носков И.В., Черепанов Д.Н. Применение технологии 3D сканирования для определения деформации оснований и фундаментов резервуаров при разработке месторождений нефти // *Вестник Евразийской науки*. 2023. Т. 15, № 5. С. 1–10. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/05NZVN523.pdf> (дата обращения: 23.02.2025).
18. Nuttens T., De Wulf A., Deruyter G., et al. Deformation Monitoring with Terrestrial Laser Scanning: Measurement and Processing Optimization Through Experience // *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2012. Vol. 2. P. 707–714. DOI:10.5593/sgem2012/s07.v2006.
19. Горохова Е.И. Геомониторинг инженерных сооружений и прогнозирование их деформаций по данным лазерного сканирования // *Вестник СГУГиТ*. 2016. № 2 (34). С. 65–72.
20. Середович В.А., Иванов А.В. Исследования точности измерений, выполненных наземным лазерным сканером // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь. IX Международный научный конгресс: сборник материалов в 3 т.* Новосибирск: СГГА, 2013. Т. 1, № 3. С. 134–143.
21. Афонин Д.А., Богомолова Н.Н., Брынь М.Я. и др. Опыт применения наземного лазерного сканирования при обследовании инженерных сооружений // *Геодезия и картография*. 2020. Т. 81, № 4. С. 2–8. DOI:10.22389/0016-7126-2020-958-4-2-8.
22. Носков И.В., Черепанов Д.Н. Комплексный геомониторинг оснований и фундаментов резервуаров вертикальных стальных (ПВС) на основе лазерного сканирования при разработке нефтяных месторождений // *Вестник Евразийской науки*. 2022. Т. 14, № 4. С. 1–13. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/03NZVN422.pdf> (дата обращения: 03.03.2025).
23. Богданов А.Н., Алешутин И.А. Наземное лазерное сканирование в строительстве и BIM-технологиях // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. № 4 (46). С. 326–332.
24. Носков И.В., Черепанов Д.Н., Прохоров А.В. Анализ методов и средств измерений для мониторинга деформации оснований и фундаментов резервуаров при обустройстве месторождений углеводородного сырья // *Ползуновский альманах*. 2024. № 1. С. 146–148.
25. Жидяев С.С., Молоков П.В. Комплексное исследование точности и надежности различных методов наземного лазерного сканирования и обработки полученных данных // *Вестник МИИГАиК. Сборник научных статей 79-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в рамках Международной студенческой недели науки СНН-2024 (8–12 апреля 2024 г.)*. М.: МИИГАиК, 2024. С. 115–127.
26. Куштин В.И., Ревякин А.А., Соколова В.А. и др. Современные методы мониторинга деформаций зданий и сооружений // *Инженерный вестник Дона*. 2020. № 11 (71). С. 27–37. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6665> (дата обращения: 02.02.2025).
27. Олейник А.М., Привалов А.В. О возможности применения наземного лазерного сканирования для деформационного мониторинга сооружений нефтегазовых месторождений // *Инновации и инвестиции*. 2021. № 4. С. 185–188.
28. Rashidi M., Mohammadi M., Sadeghlou Kivi S., et al. A Decade of Modern Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning: Review and Future Directions // *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12. Iss. 22. P. 3796. DOI:10.3390/rs12223796.
29. Жидяев С.С. Применение наземного лазерного сканирования для высокоточного геодезического мониторинга // *Российский форум изыскателей: сборник докладов V Международной научно-практической конференции (18–22 сентября 2023 г.)*. М.: КДУ; Добросвет, 2023. С. 62–66.
30. Gao R., Park J., Hu X., et al. Reflective Noise Filtering of Large-Scale Point Cloud Using Multi-Position LiDAR Sensing Data // *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Iss. 16. P. 3058. DOI:10.3390/rs13163058.

31. Shen N., Wang B., Ma H., et al. A Review of Terrestrial Laser Scanning (TLS)-Based Technologies for Deformation Monitoring in Engineering // *Measurement*. 2023. Vol. 223. P. 113684. DOI:10.1016/j.measurement.2023.113684.
32. Ruggles S., Clark J., Franke K.W., et al. Comparison of SfM Computer Vision Point Clouds of a Landslide Derived from Multiple Small UAV Platforms and Sensors to a TLS-Based Model // *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 2016. Vol. 4. Iss. 4. P. 246–265. DOI:10.1139/juvs-2015-0043.
33. Diaz V., van Oosterom P., Meijers M., et al. Comparison of Cloud-to-Cloud Distance Calculation Methods: Is the Most Complex Always the Most Suitable? // *Recent Advances in 3D Geoinformation Science*. Cham: Springer, 2024. P. 329–334. DOI:10.1007/978-3-031-43699-4_20.
34. Mukupa W., Roberts G.W., Hancock C.M., et al. A Review of the Use of Terrestrial Laser Scanning Application for Change Detection and Deformation Monitoring of Structures // *Survey Review*. 2016. Vol. 49. Iss. 353. P. 99–116. DOI:10.1080/00396265.2015.1133039.
35. Wujanz D. Terrestrial Laser Scanning for Geodetic Deformation Monitoring: Doctoral Thesis. Berlin, 2016. 169 p. DOI:10.14279/depositonce-5136.

автор **Жидяев Семен Сергеевич**

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра высшей математики, геодезический факультет

 0009-0004-1389-6755

Поступила 24.04.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликована 27.02.2026.



Experimental Study of the Capabilities of Terrestrial Laser Scanning for High-Precision Monitoring of Planar Displacements of Engineering Structures

Semen S. Zhidyaev¹✉

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ zhidyaev09@gmail.com

citation Zhidyaev SS. Experimental Study of the Capabilities of Terrestrial Laser Scanning for High-Precision Monitoring of Planar Displacements of Engineering Structures. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 29–51. DOI:10.30533/GiA-2026-002.

keywords terrestrial laser scanning, planar displacements, deformation monitoring, point cloud, data processing algorithms, measurement accuracy, building monitoring, geodetic control

abstract Modern geodetic monitoring methods require high accuracy and efficiency in detecting deformations of engineering structures. This article examines the application of terrestrial laser scanning (TLS) for determining the planar displacements of objects, with a primary focus on an experimental study of the method's accuracy. The research is based on experimental data obtained from deformation modeling and the analysis of sequential observation cycles using point clouds. The aim of the study is to assess the capabilities of the TLS method in detecting small displacements and to determine its accuracy characteristics. The paper presents the methodology for processing point clouds and the algorithms for data analysis. Experiments have been conducted to demonstrate the method's ability to detect displacements with high precision. The study identifies the limitations of TLS caused by the technical specifics of the equipment and proposes possible ways to minimize them. The results confirm the potential of TLS for high-precision structural monitoring, particularly in densely built environments where traditional methods may be less effective. The practical significance of this study lies in the possibility of integrating the proposed method into deformation monitoring systems for engineering structures such as buildings, bridges, and industrial constructions, thereby improving the reliability of geodetic measurements and enabling rapid response to critical structural changes.

references 1. Kiryunikova NM, Lesovaya NM, Gura DA. Geodezicheskiy monitoring kak sredstvo nablyudeniya za sostoyaniem ob'yektov infrastruktury [Geodetic Monitoring as a Means of Observing the Condition of Infrastructure Objects]. *Modern Problems and Prospects*

- of Development of Land and Property Relations: Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference*. Krasnodar: KSAU; 2020: 390–395. (In Russian).
2. Khannanov RR, Mikhnev AV. Geodezicheskiy monitoring sostoyaniya ograzhdayushchey damby No. 1 zolootvala TOO “GRES Topar” po metodike nazemnogo lazernogo skanirovaniya [Geodetic Monitoring of the Condition of Retaining Dam No. 1 of Ash Dump at GRES Topar Using Terrestrial Laser Scanning]. *Interexpo GEO-Sibir. Proceedings of the XVIII International Scientific Congress*. In 8 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSUGT; 2022: 13–18. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2022-1-13-18.
 3. Galiev IKh, Ibragimov RA, Ashrapov AKh. Vozmozhnosti 3D skanerov pri monitoringe rekonstruirovannykh zdaniy [Capabilities of 3D Scanners for Monitoring Reconstructed Buildings]. *BIM in Construction & Architecture: Proceedings of the IV International Conference (April 21–23, 2021)*. St. Petersburg: SPSUACE; 2021: 274–281. (In Russian). DOI:10.23968/BIMAC.2021.035.
 4. Wu C, Yuan Y, Tang Y, et al. Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry. *Sensors*. 2022;22(1): 265. DOI:10.3390/s22010265.
 5. Khannanov RR. Lazernoe skanirovanie dlya opredeleniya deformatsiy nasypnykh damb [Laser Scanning for Determining Deformations of Embankment Dams]. *Interexpo GEO-Sibir. Proceedings of the XIX International Scientific Congress*. In 8 vols. Vol. 1. Part 1. Novosibirsk: SSUGT; 2023: 149–153. (In Russian). DOI:10.33764/2618-981X-2023-1-1-149-153.
 6. Sholomitskiy AA, Lagutina EK, Soboleva EL. Primenenie lazernogo skanirovaniya dlya monitoringa bol'sheproletnykh sooruzheniy [Application of Laser Scanning for Monitoring Large-Span Structures]. *Vestnik SSUGT*. 2018;23(2): 43–57. (In Russian).
 7. Mursalimova EA, Bazhirova GK, Seitkazy AK. Geodezicheskiy kontrol' protsessa deformatsii vysokikh sooruzheniy s ispol'zovaniem tekhnologii nazemnogo lazernogo skanirovaniya [Geodetic Control of High-Rise Structures Deformation Using Terrestrial Laser Scanning]. *The Scientific Heritage*. 2022;101: 28–34. (In Russian). DOI:10.5281/zenodo.7340757.
 8. Vasileva MD. Problema stroitel'stva v stesnennykh usloviyakh gorodskoy sredy (zastroyki) [The Problem of Construction in Constrained Urban Environments]. *Innovative Methods of Organizing Construction Production: Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference (November 17–18, 2022)*. St. Petersburg: SPSUACE; 2023: 78–84. (In Russian).
 9. Mamchenkov VD. Osobennosti stroitel'stva v usloviyakh plotnoy gorodskoy zastroyki [Features of Construction in Dense Urban Environments]. *Molodoy uchenyy*. 2023;46 (493): 44–47. (In Russian). Available from: <https://moluch.ru/archive/493/107716> (Accessed 23 February 2025).
 10. Fil' OA, Shapovalov SI, Kasimov AO. Organizatsiya stroitel'stva v stesnennykh usloviyakh zhilygo doma [Organization of Construction in Constrained Conditions of a Residential Building]. *Engineering Bulletin of Don*. 2019;1(52): 150. (In Russian). Available from: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5590> (Accessed 23 February 2025).
 11. Cherednichenko TF, Tukhareli VD, Snegirev DP. Napravlennost' sovremennogo stroitel'stva – zastroyka gorodov v stesnennykh usloviyakh [Modern Construction Trends – Building in Constrained Urban Areas]. *Engineering Bulletin of Don*. 2018;1(48): 145. (In Russian). Available from: <https://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4743> (Accessed 23 February 2025).
 12. Akopyan GT, Kiryunikova NM, Lesovaya ED, et al. Opyt ispol'zovaniya Cyclone dlya modelirovaniya i opredeleniya smeshcheniya ob'yekta v prostranstve [Experience in Using Cyclone for Modeling and Determining Object Displacement in Space]. *Scientific Papers of Kuban State Technological University*. 2020;8: 932–941. (In Russian). Available from: <https://ntk.kubstu.ru/data/mc/0081/4130.pdf> (Accessed 23 February 2025).
 13. Zhou Y, Zhu J, Zhao L, et al. High-Precision Monitoring Method for Bridge Deformation Measurement and Error Analysis Based on Terrestrial Laser Scanning. *Remote Sensing*. 2024;16(13): 2263. DOI:10.3390/rs16132263.

14. Xu H, Li H, Yang X, et al. Integration of Terrestrial Laser Scanning and NURBS Modeling for the Deformation Monitoring of an Earth-Rock Dam. *Sensors*. 2019;19(1): 22. DOI:10.3390/s19010022.
15. Sholomitskiy AA, Khannanov RR, Oleynikova EA. Osobennosti obrabotki i analiza rezul'tatov nazemnogo lazernogo skanirovaniya pri geodezicheskom monitoringe zemlyanykh damb [Features of Processing and Analyzing TLS Results for Geodetic Monitoring of Earth Dams]. *Vestnik SSUGT*. 2024;29(2): 31–40. (In Russian). DOI:10.33764/2411-1759-2024-29-2-31-40.
16. Seo H. Tilt Mapping for Zigzag-Shaped Concrete Panel in Retaining Structure Using Terrestrial Laser Scanning. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2021;11: 851–865. DOI:10.1007/s13349-021-00484-x.
17. Noskov IV, Cherepanov DN. Primenenie tekhnologii 3D skanirovaniya dlya opredeleniya deformatsii osnovaniy i fundamentov rezervuarov pri razrabotke mestorozhdeniy nefti [Application of 3D Scanning for Determining Deformations of Foundations During Oil Field Development]. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023;15(5): 1–10. (In Russian).
18. Nuttens T, De Wulf A, Deruyter G, et al. Deformation Monitoring with Terrestrial Laser Scanning: Measurement and Processing Optimization Through Experience. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*. 2012;2: 707–714. DOI:10.5593/sgem2012/s07.v2006.
19. Gorokhova EI. Geomonitoring inzhenernykh sooruzheniy i prognozirovaniye ikh deformatsiy po dannym lazernogo skanirovaniya [Geomonitoring of Engineering Structures and Deformation Prediction Using Laser Scanning Data]. *Vestnik SSUGT*. 2016;2(34): 65–72. (In Russian).
20. Seredovich VA, Ivanov AV. Issledovaniya tochnosti izmereniy, vypolnennykh nazemnym lazernym skanerom [Accuracy Analysis of Terrestrial Laser Scanner Measurements]. *Interexpo GEO-Sibir. Proceedings of the IX International Scientific Congress*. In 3 vols. Vol. 1. Novosibirsk: SSGA; 2013: 134–143. (In Russian).
21. Afonin DA, Bogomolova NN, Bryn MYa, et al. Opyt primeneniya nazemnogo lazernogo skanirovaniya pri obsledovanii inzhenernykh sooruzheniy [Experience in the Use of Ground-Based Laser Scanning at Inspecting Engineering Structures]. *Geodesy and Cartography*. 2020;81(4): 2–8. (In Russian). DOI:10.22389/0016-7126-2020-958-4-2-8.
22. Noskov IV, Cherepanov DN. Kompleksnyy geomonitoring osnovaniy i fundamentov rezervuarov vertikal'nykh stal'nykh (RVS) na osnove lazernogo skanirovaniya [Integrated Geomonitoring of Vertical Steel Tank Foundations Using TLS]. *The Eurasian Scientific Journal*. 2022;14(4): 1–13. (In Russian). Available from: <https://esj.today/PDF/03NZVN422.pdf> (Accessed 3 March 2025).
23. Bogdanov AN, Aleshutin IA. Nazemnoe lazernoe skanirovaniye v stroitel'stve i BIM-tekhnologiyakh [Terrestrial Laser Scanning in Construction and BIM Technologies]. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2018;4(46): 326–332. (In Russian).
24. Noskov IV, Cherepanov DN, Prokhorov AV. Analiz metodov i sredstv izmereniy dlya monitoringa deformatsii osnovaniy i fundamentov rezervuarov pri obustroystve mestorozhdeniy uglevodorodnogo syr'ya [Analysis of Measurement Methods for Monitoring Deformations of Hydrocarbon Field Foundations]. *Polzunovsky Almanac*. 2024;1: 146–148. (In Russian).
25. Zhidayev SS, Molokov PV. Kompleksnoe issledovaniye tochnosti i nadezhnosti razlichnykh metodov TLS i obrabotki dannykh [Comprehensive Study of Accuracy and Reliability of Various TLS Methods and Data Processing]. *Vestnik MIIGAiK. Proceedings of the 79th Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists within the Framework of the International Student Science Week SNN-2024 (April 8–12, 2024)*. Moscow: MIIGAiK; 2024: 115–127. (In Russian).
26. Kushtin VI, Revyakin AA, Sokolova VA, et al. Sovremennyye metody monitoringa deformatsiy zdaniy i sooruzheniy [Modern Methods of Monitoring Deformations of Buildings and Structures]. *Engineering Bulletin of Don*. 2020;11(71): 27–37. (In Russian). Available from: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2020/6665> (Accessed 2 February 2025).
27. Oleynik AM, Privalov AV. O vozmozhnosti primeneniya nazemnogo lazernogo skanirovaniya dlya deformatsionnogo monitoringa sooruzheniy neftegazovykh

- mestorozhdeniy [On the Feasibility of Using TLS for Deformation Monitoring of Oil and Gas Field Structures]. *Innovation & Investment*. 2021;4: 185–188. (In Russian).
28. Rashidi M, Mohammadi M, Sadeghlou Kivi S, et al. A Decade of Modern Bridge Monitoring Using Terrestrial Laser Scanning: Review and Future Directions. *Remote Sensing*. 2020;12(22): 3796. DOI:10.3390/rs12223796.
 29. Zhidayev SS. Primenenie nazemnogo lazernogo skanirovaniya dlya vysokotochnogo geodezicheskogo monitoringa [Application of TLS for High-Precision Geodetic Monitoring]. *Russian Prospectors Forum: Proceedings of the V International Scientific and Practical Conference (September 18–22, 2023)*. Moscow: KDU; Dobrosvet; 2023: 62–66. (In Russian).
 30. Gao R, Park J, Hu X, et al. Reflective Noise Filtering of Large-Scale Point Cloud Using Multi-Position LiDAR Sensing Data. *Remote Sensing*. 2021;13(16): 3058. DOI:10.3390/rs13163058.
 31. Shen N, Wang B, Ma H, et al. A Review of Terrestrial Laser Scanning (TLS)-Based Technologies for Deformation Monitoring in Engineering. *Measurement*. 2023;223: 113684. DOI:10.1016/j.measurement.2023.113684.
 32. Ruggles S, Clark J, Franke KW, et al. Comparison of SfM Computer Vision Point Clouds of a Landslide Derived from Multiple Small UAV Platforms and Sensors to a TLS-Based Model. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. 2016;4(4): 246–265. DOI:10.1139/jjuvs-2015-0043.
 33. Diaz V, van Oosterom P, Meijers M, et al. Comparison of Cloud-to-Cloud Distance Calculation Methods: Is the Most Complex Always the Most Suitable? *Recent Advances in 3D Geoinformation Science*. Cham: Springer; 2024: 329–334. DOI:10.1007/978-3-031-43699-4_20.
 34. Mukupa W, Roberts GW, Hancock CM, et al. A Review of the Use of Terrestrial Laser Scanning Application for Change Detection and Deformation Monitoring of Structures. *Survey Review*. 2016;49(353): 99–116. DOI:10.1080/00396265.2015.1133039.
 35. Wujanz D. *Terrestrial Laser Scanning for Geodetic Deformation Monitoring*. Doctoral Thesis. Berlin; 2016. 169 p. DOI:10.14279/depositonce-5136.

author **Semen S. Zhidyaev**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Higher Mathematics, Faculty of Geodesy

 0009-0004-1389-6755

Submitted: April 24, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.