

Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК 528.721.221.6

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-34-44>

Методика оценки качества сканирования высокодетализированных поверхностей при помощи наземного лазерного сканера

А. О. Куприянов¹, Д. А. Морозов¹, Д. С. Мелихова¹✉, П. В. Молоков¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
г. Москва, Российская Федерация

e-mail: melihova_darua@mail.ru

Аннотация. В статье представлена методика оценки качества данных наземного лазерного сканирования высокодетализированных поверхностей. Рассмотрены возможные сферы применения данной методики и основные факторы, влияющие на качество данных. Экспериментальная апробация методики выполнена с использованием трехмерных марок с известными геометрическими параметрами и двух наземных лазерных сканеров – Leica RTC360 и Trimble TX6. Обработка данных производилась с применением программного обеспечения CloudCompare, Leica REGISTER 360 PLUS, Trimble RealWorks и Leica Cyclone 3DR. По результатам обработки вычислены статистические показатели, выступающие в качестве критериев качества сканирования, и проведена интерпретация полученных результатов. Оценена повторяемость (СКП от 1 до 14 %) результатов получения параметров, характеризующих качество материалов лазерного сканирования, и выполнен сравнительный анализ разностей параметров и наблюдаемых отличий в облаках точек для использованных сканеров. Разработанный подход позволяет оценивать качество сканирования объектов, характерные размеры элементов которых составляют первые сантиметры.

Ключевые слова: наземное лазерное сканирование, оценка точности, высокодетализированные поверхности, облако точек, оценка качества, трехмерные марки, математическая статистика, прикладная геодезия

Для цитирования:

Куприянов А. О., Морозов Д. А., Мелихова Д. С., Молоков П. В. Методика оценки качества сканирования высокодетализированных поверхностей при помощи наземного лазерного сканера. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 5. С. 34–44. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-34-44>

Methodology for assessing the quality of terrestrial laser scanning of highly detailed surfaces

A. O. Kupriyanov¹, D. A. Morozov¹, D. S. Melikhova¹✉, P. V. Molokov¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russian Federation

e-mail: melihova_darua@mail.ru

Abstract. The article presents a methodology for assessing the quality of terrestrial laser scanning (TLS) data acquired over highly detailed surfaces. Potential application domains and the principal factors influencing data quality are discussed. Experimental validation was conducted using three-dimensional targets with known geometric parameters and two TLS instruments: the Leica RTC360 and the Trimble TX6. Data processing was performed in CloudCompare, Leica REGISTER 360 PLUS, Trimble RealWorks, and Leica Cyclone 3DR. Statistical metrics were derived from the processing results and adopted as cri-

teria for scanning quality, followed by interpretation of the findings. Repeatability was assessed (RMSE ranging from 1 to 14%) for parameters characterizing TLS data quality, and a comparative analysis of parameter differences and observed discrepancies in the point clouds from the two scanners was carried out. The proposed approach enables quality assessment of scans of objects with characteristic feature sizes on the order of a few centimeters.

Keywords: terrestrial laser scanning, accuracy assessment, highly detailed surfaces, point cloud, quality assessment, 3D targets, mathematical statistics, applied geodesy

For citation:

Kupriyanov A. O., Morozov D. A., Melikhova D. S., Molokov P. V. (2026). Methodology for assessing the quality of terrestrial laser scanning of highly detailed surfaces. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 5. pp. 34–44. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-5-34-44>

Введение

Технология наземного лазерного сканирования (НЛС) широко применяется для дистанционного получения высокоточных пространственных данных об объекте, что требуется для инженерных сооружений [1–3], памятников историко-культурного наследия [4–6], зданий сложной конфигурации [7], отдельно стоящих малых архитектурных форм [8]. Эти объекты характеризуются элементами высокой плотности детализации. К ним относятся детали инженерных систем (узлы, сварочные швы, фланцевые соединения, отводы, трубы малого диаметра) [9, 10], декоративные элементы фасадов и интерьеров (барельефы, скульптурная лепнина, колонны, арки) [11], а также детали скульптур и памятников разных форм с выраженной трехмерной текстурой и орнаментом, компоненты пространственных конструкций, характеризующиеся узловыми соединениями [12]. На таких объектах технология НЛС применяется для мониторинга технического состояния с целью выявления процессов деформаций; обследования для разработки проектной документации реставрации или реконструкции с фиксацией подлинной геометрической конфигурации объекта, создания цифровых двойников для интеграции с технологиями информационного моделирования (ТИМ) и обратного проектирования. Для поверхностей с высокой плотностью детализации, характерные элементы которых имеют размеры в пределах первых сантиметров, на точность получаемых пространственных данных влияют следующие факторы [13–17]: дивергенция лазерного луча, методы обработки

измерительной информации в сканере (в частности алгоритмы фильтрации шумов), угол падения луча на поверхность и т. д. Дивергенция лазерного луча влияет на точность сканирования сложных поверхностей. В отличие от плоских поверхностей, перпендикулярных лучу, на сложных поверхностях из-за размера пятна (который зависит от характеристик сканера и расстояния) расстояние измеряется до «средней» точки. Ее положение зависит от формы поверхности и алгоритмов обработки в оборудовании. Погрешности измерения углов незначительны для плоских объектов, но критичны для высокодетализированных поверхностей. Следует отметить, что влияние вышеперечисленных факторов на качество сканирования напрямую не может быть выведено только из паспортных характеристик прибора и требует целенаправленных экспериментальных исследований.

Цель настоящей статьи – разработка методики оценки качества НЛС детализированных поверхностей. Для ее достижения необходимо решить следующие задачи: проанализировать сферы применения НЛС; определить факторы, влияющие на качество сканирования высокодетализированных поверхностей; разработать методику; запроектировать и изготовить экспериментальные трехмерные марки; выполнить апробацию разработанной методики; проанализировать полученные результаты.

Методы и материалы

Для оценки качества сканирования высокодетализированных поверхностей при помощи НЛС предлагается следующая методика:

1) в качестве референсных поверхностей используются трехмерные марки, изготавливаемые следующим образом: проектируются трехмерные модели марок с требуемой текстурой; модели печатаются на 3D-принтере и крепятся к адаптеру; производятся контрольные промеры для сравнения напечатанных марок с исходной моделью и оценки точности изготовления;

2) выполняется сканирование марок при помощи исследуемого сканера с минимального расстояния сканирования и с расстояния 2,2 м. В процессе сканирования контролируются микроклимат помещения и освещенность марки;

3) для каждой марки выполняется обработка в следующем порядке:

- полученное облако точек лазерных отражений (ТЛО) сшивается с референсной моделью марки;

- выполняется сравнение положения точек облака ТЛО с референсной моделью при помощи программного обеспечения (ПО) CloudCompare, вычисляются смещения ТЛО по расстоянию и каждой из координатных осей (dX , dY , dZ);

- вычисляются критерии качества сканирования по совокупности вычисленных отклонений отдельно для каждой координатной оси. В качестве критериев используются:

- средняя квадратическая погрешность (СКП) m ;

- процент значений, выходящих за пределы доверительного интервала для доверительной вероятности 68,27 % (d_m), 95,45 % (d_{2m}) и 99,73 % (d_{3m});

- эксцесс (E) и асимметрия (A) выборки;

- коэффициент корреляции между отклонением и положением точки по оси X (r_X) и Y (r_Y);

- коэффициент корреляции между отклонениями по трем координатным осям X , Y , Z ($r_{\Delta X}$, $r_{\Delta Y}$, $r_{\Delta Z}$);

4) производится анализ вычисленных критериев и формулируются выводы касательно качества сканирования детализированных поверхностей исследуемым сканером.

Для реализации методики использовались три типа марок:

1) марка № 1 размерами $0,2 \times 0,2$ м с выпуклыми гранями следующих размеров: 0,005; 0,03; 0,025; 0,02; 0,015; 0,015; 0,005 м; углубления марки составляют 0,015 м;

2) марка № 2 размерами $0,2 \times 0,2$ м с выпуклыми гранями размерами 0,01 м по краям и 0,015 м – в остальных местах; углубления марки составляют 0,015 м;

3) третья марка размерами $0,2 \times 0,2$ м в виде персонажа древнегреческой мифологии Медузы. Данная марка отличается высокодетализированной трехмерной текстурой, так как каждый сантиметр содержит в себе множество элементов.

Трехмерные модели марок были созданы в программе Autodesk AutoCAD. Марки были изготовлены при помощи технологии 3D-печати из пластмассы на принтере Elegoo Neptun. Внешний вид марок с установленным креплением для стандартной геодезической подставки приведен ниже (рис. 1).

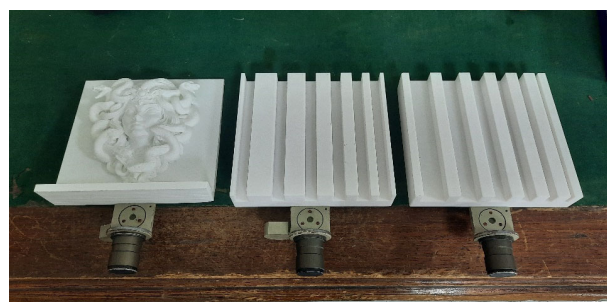


Рис. 1. Готовые марки с креплениями для установки на подставке

Номинальная точность печати в соответствии с паспортными характеристиками для данной модели принтера составляет $\pm 0,1$ мм. Для оценки фактической точности изготовления марок были проведены контрольные обмеры, выполненные штангенциркулем ЧИЗ ШЦ-1-150, СКП которого составляет 0,02 мм. Для каждой марки были выполнены промеры расстояний между парами характерных точек (для марки № 1 выполнено 33 промера, для марки № 2 – 34 промера, для марки «Медуза» – 20 промеров).

Априорные значения расстояний между характерными точками были получены по ис-

ходным трехмерным моделям марок в ПО CloudCompare. Для каждой пары характерных точек была вычислена разность расстояния Δ_S , измеренного натурно штангенциркулем и по цифровой модели в программном обеспечении:

$$\Delta_S = S_{nature} - S_{project}, \quad (1)$$

где S_{nature} – расстояние, вычисленное между характерными точками натурно; $S_{project}$ – расстояние, вычисленное между характерными точками в программном обеспечении.

Значение средней квадратической погрешности взаимного положения точек марки m_p вычисляется по следующей формуле:

$$m_p = \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{3}}} \cdot \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\Delta_S)^2}}{n}, \quad (2)$$

где n – количество промеров.

По результатам вычислений получены следующие СКП взаимного положения точек марок: для марки «Медуза» – 0,33 мм; для марки с выпуклыми гранями различных размеров – 0,30 мм; для марки с выпуклыми гранями одинаковых размеров – 0,26 мм. Таким образом, погрешности изготовления марок в три и более раза меньше, чем погрешности сканирования, не окажут существенного влияния на оценку критериев качества сканирования.

В ходе апробации методики были использованы два наземных лазерных сканера: Leica RTC360 и Trimble TX6. Первый из них предо-

ставлен Центром коллективного пользования «Центр высокоточной навигации, позиционирования и систем сбора пространственных данных» Московского государственного университета геодезии и картографии (МИИГАиК). Основные технические характеристики данных приборов систематизированы ниже (табл. 1).

Таблица 1. Основные технические характеристики Leica RTC360 и Trimble TX6

Основные характеристики	Leica RTC360	Trimble TX6
Размер лазерного пятна на поверхности на дистанции в 10 м	6 мм	6 мм
СКП измерения углов	18"	16,5"
СКП измерения расстояний	1 мм + 10 ppm	2 мм
Диапазон измерений	От 0,5 до 130 м	От 0,6 м до 120 м

Приведенные инструменты имеют близкие технические характеристики, но при этом основаны на разной технологической базе и относятся к разным поколениям (год выпуска Leica RTC360 – 2025, Trimble TX6 – 2016). Исходя из этого и предварительных визуальных оценок облаков точек лазерных отражений, получаемых при помощи этих инструментов, можно рассчитывать на получение ощутимой разницы в критериях качества, вычисленных при реализации методики.

При выполнении измерений обеспечивалась установка инструмента и марки на стабильных основаниях (рис. 2).

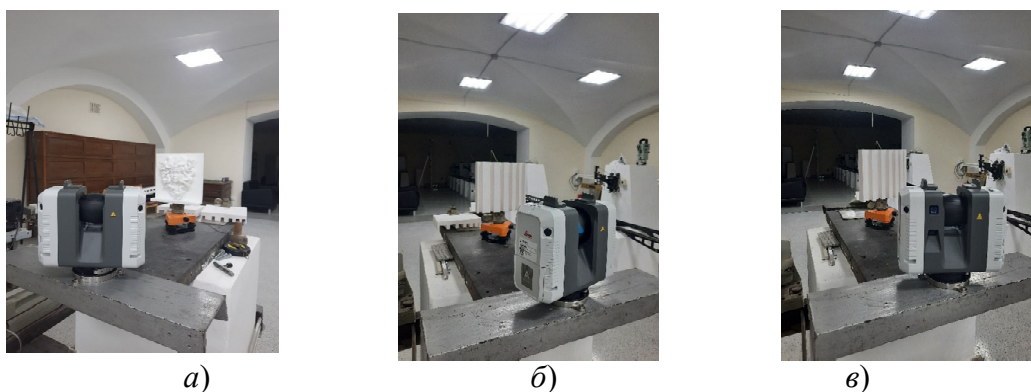


Рис. 2. Выполнение измерений на дистанции 0,5 м с использованием Leica RTC360: а) марка «Медуза»; б) марка № 1; в) марка № 2

В процессе проведения измерений обеспечивался контроль микроклиматических параметров (температура, относительная влажность) и освещенности для соблюдения стандартных условий при выполнении эксперимента двумя приборами, так как даже небольшие искажения могут существенно повлиять на результаты сканирования. Для измерения уровня освещенности в помещениях был использован люксметр ЭКСИС ЛМ-12, для измерения температуры и относительной влажности использовался термогигрометр МЕГЕОН 20062. Параметры микроклимата в лабораторном помещении составляли: температура воздуха – 20–21 °С, относительная влажность – 63–65 %, освещенность – 520 лк.

Все измерения для каждой марки выполнялись двух расстояниях:

- 1) на минимальной паспортной дистанции: 0,5 м для Leica RTC360 и 0,6 м для Trimble TX6;
- 2) на дистанции в 2,2 м для обоих приборов.

Предобработка полученных данных осуществлялась в программных комплексах Leica REGISTER 360 PLUS и Trimble RealWorks, где была выполнена регистрация облаков точек. Для очистки данных от посторонних элементов использовалось ПО Leica Cyclone 3DR, после чего трехмерные данные были выгружены в формат E57.

Сравнение полученных облаков точек в формате E57 с эталонными моделями в формате STL выполнялось в ПО Cloud Compare. Для этого каждая эталонная марка была преобразована в облако точек с помощью инструмента Sample points on a mesh. Затем с использованием инструмента Compute cloud/cloud distance производилось сравнение между эталонными облаками точек и облаками точек, полученными в ходе измерений. Так были получены отклонения измеренных марок от эталонных в цифровом виде. Вычисление статистик, которые выступают в качестве критериев качества сканирования, производилось по полученным данным в Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

По результатам апробации методики получены следующие данные:

- 1) критерии качества сканирования для НЛС Leica RTC360 на расстояниях 0,5 и 2,2 м для трех типов объемных марок (табл. 2);
- 2) критерии качества сканирования для НЛС Trimble TX6 на расстояниях 0,6 и 2,2 м для трех типов объемных марок (табл. 3);
- 3) критерии качества сканирования для НЛС Leica RTC360 на расстоянии 2,2 м для 7 независимых повторений методики.

Таблица 2. Критерии качества сканирования для НЛС Leica RTC360 на расстояниях 0,5 и 2,2 м для трех типов объемных марок по координатным осям

Критерий	X	Y	Z	X	Y	Z
	Дистанция в 0,5 м			Дистанция в 2,2 м		
	Марка № 1					
m , м	0,0011	0,0002	0,0011	0,0007	0,0002	0,0008
$ d > m$, %	23,95	22,45	27,60	13,91	30,85	25,33
$d_m d > 2 \cdot m$, %	21,15	2,31	6,51	7,16	4,40	6,22
$ d > 3 \cdot m$, %	3,72	0,69	1,00	3,47	0,26	1,49
A / E	−0,09/2,90	2,41/30,54	0,50/1,79	0,17/2,42	1,20/0,88	−0,62/3,89
r_X	0,36043	0,02735	−0,00345	0,00308	−0,34767	0,15368
r_Y	−0,10135	0,06336	0,00708	−0,04090	0,03263	−0,05328
$r_{\Delta X}$	1	−0,00299	−0,01913	1	−0,00997	−0,01497
$r_{\Delta Y}$	−0,00299	1	0,05429	−0,00997	1	−0,29888
$r_{\Delta Z}$	−0,01913	0,05429	1	−0,01497	−0,29888	1

Окончание табл. 2

Критерий	X	Y	Z	X	Y	Z
	Дистанция в 0,5 м			Дистанция в 2,2 м		
	Марка № 2					
m , м	0,0010	0,0002	0,0011	0,0008	0,0002	0,0009
$ d > m$, %	20,45	25,51	26,90	15,71	31,18	25,08
$ d > 2 \cdot m$, %	7,55	8,46	6,57	7,55	2,61	6,57
$ d > 3 \cdot m$, %	2,54	0,34	1,04	2,52	0,33	1,49
A/E	−0,08/4,80	1,77/26,38	0,47/2,26	1,66/10,33	3,83/23,13	−0,51/9,59
r_X	0,34391	0,02150	−0,04597	0,20409	−0,28784	0,05370
r_Y	−0,04970	−0,03758	0,00681	0,00045	0,11516	−0,05066
$r_{\Delta X}$	1	0,00089	−0,01720	1	0,00585	−0,01064
$r_{\Delta Y}$	0,00089	1	0,00044	0,00585	1	−0,27871
$r_{\Delta Z}$	−0,01720	0,00044	1	−0,01064	−0,27871	1
	Марка «Медуза»					
m , м	0,0007	0,0007	0,0013	0,0006	0,0006	0,0011
$ d > m$, %	16,78	16,30	21,15	18,01	16,07	20,76
$ d > 2 \cdot m$, %	5,01	5,40	4,41	5,30	4,84	4,44
$ d > 3 \cdot m$, %	1,85	2,18	1,77	1,77	1,94	2,03
A/E	−0,81/18,60	0,75/14,65	1,05/8,76	0,21/15,25	1,05/18,07	1,15/8,04
r_X	0,16003	0,05571	−0,00011	0,04860	−0,06406	−0,02235
r_Y	−0,14119	0,14241	−0,01006	0,06987	0,06185	0,01262
$r_{\Delta X}$	1	−0,09053	0,05353	1	−0,08606	0,01296
$r_{\Delta Y}$	−0,09053	1	−0,02262	−0,08606	1	−0,00559
$r_{\Delta Z}$	0,05353	−0,02262	1	0,01296	−0,00559	1

Таблица 3. Критерии качества сканирования для НЛС Trimble TX6 на расстояниях 0,6 и 2,2 м для трех типов объемных марок по координатным осям

Критерий	X	Y	Z	X	Y	Z
	Дистанция в 0,6 м			Дистанция в 2,2 м		
	Марка № 1					
m , м	0,0012	0,0004	0,0024	0,0008	0,0003	0,0014
$ d > m$, %	19,77	11,59	24,21	16,53	12,25	28,46
$ d > 2 \cdot m$, %	7,69	2,04	6,48	7,53	1,83	6,57
$ d > 3 \cdot m$, %	2,72	1,75	2,55	3,10	1,38	0,72
A/E	0,27/6,18	6,31/52,54	2,05/10,23	-0,14/7,62	-3,62/41,28	2,09/11,91
r_X	0,24158	-0,00971	0,08730	0,20291	-0,05570	0,08521
r_Y	0,01408	0,19902	-0,01131	0,04543	0,13097	-0,03039
$r_{\Delta X}$	1	-0,05237	-0,09051	1	0,02069	-0,05588
$r_{\Delta Y}$	-0,05237	1	0,08902	0,02069	1	-0,09409
$r_{\Delta Z}$	-0,09051	0,08902	1	-0,05588	-0,09409	1

Окончание табл. 3

Критерий	X	Y	Z	X	Y	Z
	Дистанция в 0,5 м			Дистанция в 2,2 м		
	Марка № 2					
m , м	0,0012	0,0002	0,0023	0,0007	0,0002	0,0013
$ d > m$, %	17,35	15,98	25,84	16,01	19,48	28,88
$ d > 2 \cdot m$, %	7,38	2,34	6,72	8,19	2,07	6,27
$ d > 3 \cdot m$, %	2,63	1,39	2,77	2,16	2,54	0,92
A/E	−0,26/7,43	−3,38/43,07	2,04/9,80	0,25/14,37	3,43/38,88	0,91/4,48
r_X	0,21351	−0,06545	0,12913	0,02580	0,01967	0,01839
r_Y	0,08045	0,13876	−0,02979	−0,03254	0,09550	0,00071
$r_{\Delta X}$	1	0,02452	−0,05628	1	0,03378	0,01643
$r_{\Delta Y}$	0,02452	1	−0,10318	0,03378	1	0,10080
$r_{\Delta Z}$	−0,05628	−0,10318	1	0,01643	0,10080	1
	Марка «Медуза»					
m , м	0,0008	0,0009	0,0020	0,0006	0,0006	0,0013
$ d > m$, %	15,12	11,87	26,03	16,64	16,02	27,35
$ d > 2 \cdot m$, %	5,49	4,35	5,45	6,13	6,14	5,30
$ d > 3 \cdot m$, %	2,20	1,90	1,04	2,16	2,54	0,92
A/E	0,27/16,43	3,12/31,15	0,95/4,14	−0,11/15,78	1,17/12,17	0,40/2,29
r_X	0,01100	0,01986	0,02806	0,00786	−0,01132	0,00978
r_Y	−0,02913	0,10595	−0,01140	−0,05209	0,05440	0,03422
$r_{\Delta X}$	1	0,03843	0,02027	1	−0,03871	0,03303
$r_{\Delta Y}$	0,03843	1	0,10756	−0,03871	1	−0,08345
$r_{\Delta Z}$	0,02027	0,10756	1	0,03303	−0,08345	1

Третий набор данных получен для оценки повторяемости результатов, полученных при помощи предложенной методики. СКП критериев качества, рассчитанные по семи повторениям, составили от 1 до 14 % (рис. 3).

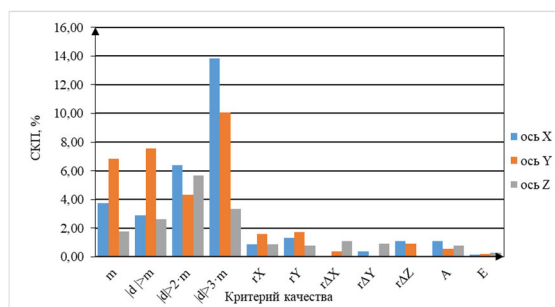


Рис. 3. График значений критериев качества сканирования для НЛС Leica RTC360 на расстоянии 2,2 м для семи независимых повторений методики

Из приведенных данных в табл. 2 следует, что для качества сканирования НЛС Leica RTC360 характерно следующее:

– на дистанциях 0,5 и 2,2 м СКП для всех типов марок по осям X и Y находится в интервале от 0,2–1,1 мм, по оси Z – в интервале от 0,8–1,3 мм. Ухудшение точности по оси Z является ожидаемым и не превышает паспортных значений. В целом процентные доли на дистанциях 0,50 и 2,20 м различаются от 1 до 5 %, что свидетельствует о высокой повторяемости и стабильности измерений, а также о том, что качество сканирования не ухудшается при увеличении дистанции до 2,20 м в данных условиях. Наилучшую стабильность и близость к нормальному закону распределения демонстрирует марка «Медуза». Марки № 1 и 2 отличаются повышен-

ной долей выбросов, причем наиболее критично это проявляется по оси X при измерениях с близкой дистанции, что указывает на наличие систематических искажений, увеличение шума или появление грубых погрешностей;

- на обеих дистанциях для большинства коэффициентов корреляции значения не превышают 0,3, что по шкале Чеддока соответствует слабой степени связи. Это свидетельствует о наличии систематических погрешностей в отдельных областях облака ТЛО;

- значения асимметрии и эксцесса изменяются незначительно при переходе от 0,5 к 2,2 м, что подтверждает высокую стабильность измерений. Близкие к нулю значения асимметрии указывают на отсутствие систематических смещений. Для марок № 1 и 2 характерен высокий эксцесс до 30,5, что говорит об островершинном распределении с длинными хвостами. У марки «Медуза» эксцесс заметно ниже (8–18), а асимметрия не превышает 1,15, поэтому ее распределение более симметрично и приближено к нормальному.

На основании табл. 3 можно охарактеризовать качество сканирования для НЛС Trimble TX6 следующим образом:

- с увеличением дистанции с 0,6 до 2,2 м значения СКП по оси Z значительно различаются для всех марок, но максимальное значение сопоставимо с паспортной точностью дальномера. В целом наблюдается тенденция к росту доли выбросов при увеличении дистанции. Это ожидаемо, так как с ростом дистанции увеличивается размер лазерного пятна и шум дальномера;

- на обеих дистанциях для большинства коэффициентов корреляции значения не превышают 0,3;

- при сравнении значений эксцесса и асимметрии на разных дистанциях выявлена выраженная нестабильность, особенно по оси Y . Так, эксцесс по Y для марки № 1 на 0,6 м достигает 52,54, а на 2,2 м снижается до 41,28, при этом остается крайне высоким. Асимметрия по Y также сильно варьируется от 1,17 до 6,31.

Наблюдаемые различия в значениях критериев качества могут быть соотнесены с ви-

зуально наблюдаемыми отличиями полученных облаков ТЛО (рис. 4).

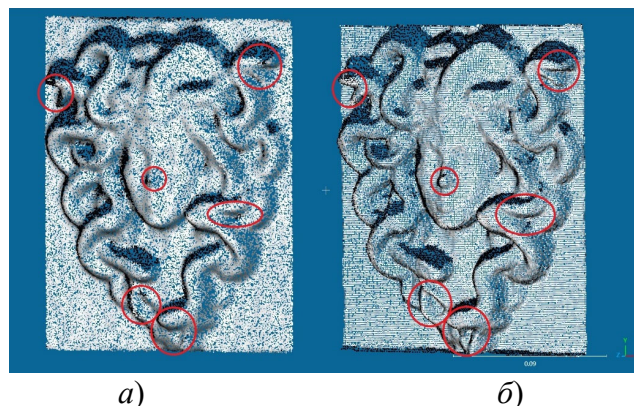


Рис. 4. Облако точек марки «Медуза», полученное на расстоянии 2,20 м с помощью двух НЛС: а) Leica RTC360; б) Trimble TX6

Облако точек, полученное с использованием Leica RTC360, выглядит более структурированным: на нем четко выделяются контуры тел и ротовые полости змей – они непрерывны и имеют резкие границы, что позволяет идентифицировать даже мелкие ответвления; отчетливо распознаются черты лица – ооконтурены глазницы, прослеживается форма носа с переносицей и крыльями, видны линии губ и контур подбородка. В то же время облако от Trimble TX6 демонстрирует заметное сглаживание микротекстуры: тонкие линии становятся прерывистыми, края элементов размыты, черты лица теряют четкость, что приводит к потере детализации.

Сравнение показывает, что в целом Trimble TX6 уступает Leica RTC360 по большинству критериев, особенно по стабильности вдоль оси Z . СКП у Trimble TX6 выше по всем осям, особенно по Z для марки № 1 (в 2,2 раза на минимальной дистанции и в 1,75 на дистанции 2,2 м), что указывает на меньшую точность дальномера даже на короткой дистанции. Количество выбросов на минимальной дистанции и на дистанции 2,2 м (d_m, d_{2m}) у Trimble TX6 в основном превышает значения Leica RTC360 не более чем в 2 раза; для d_{3m} превышение достигает 4,1 раза на минимальной дистанции и 7,7 раза на дистанции 2,2 м. Наблюдается существенное увеличение эксцесса у Trimble TX6 по оси

Z в 4,3–5,7 раза, тогда как для остальных осей на минимальной дистанции различие составляет от 0,7 до 3,1 раза; на дистанции 2,2 м различия для всех осей не превышают 3 раз (за исключением аномального случая по оси Y для марки № 1, где отношение достигает 46,9). На всех дистанциях у Trimble TX6 асимметрия отличается от Leica RTC360 в пределах до 3,3 раза, что говорит о значительном смещении распределения ошибок и является критичным для подобных объектов.

Заключение

В рамках исследования была разработана и апробирована методика оценки качества наземного лазерного сканирования высокотализированных поверхностей. По результатам апробации методики могут быть сделаны следующие выводы:

- методика позволяет количественно оценить различия в качестве данных НЛС, которые визуальным образом наблюдаются при анализе облаков ТЛО;

- методика обеспечивает воспроизводимый результат. Большая часть параметров варьируется от подхода к подходу с СКП не более 2 %, а остальные – с СКП не более 14 %. Наибольший разброс наблюдается для d_{3m} , что является закономерным и объясняется физической сущностью данного критерия, характеризующего редко встречающиеся грубые погрешности;

- качество облаков ТЛО при сканировании поверхностей с мелкой детализацией может существенно отличаться для НЛС с близкими техническими характеристиками (Leica RTC360 и Trimble TX6).

Разработанная методика может использоваться для сравнения моделей специализированных сканеров (Konica Minolta VI-9i, Z+F FlexScan 22), сканирующих тахеометров (Trimble SX10), сканирующих трекеров (Leica Absolute Tracker ATS600) и обоснования их выбора для решения конкретных геодезических задач, оценки технического состояния конкретных образцов НЛС, исследования влияния внешних условий на качество сканирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Piekarczyk A., Mazurek A., Szer J., Szer I. A Case Study of 3D Scanning Techniques in Civil Engineering Using the Terrestrial Laser Scanning Technique. Buildings. 2024. Vol. 14. P. 3703. DOI 10.3390/buildings14123703.
2. Новоселов Д. Б. Применение наземных лазерных сканеров при геодезическом сопровождении строительства горнодобывающих промышленных предприятий. Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVIII Междунар. науч. конгр., 18–20 мая 2022 г., Новосибирск : сборник материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». Новосибирск : СГУГиТ, 2022. С. 104–112. DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-104-112.
3. Siwiec J., Lenda G. Integration of terrestrial laser scanning and structure from motion for the assessment of industrial chimney geometry. Measurement. 2022. Vol. 199. P. 1–12. DOI 10.1016/j.measurement.2022.111404.
4. Liu S., Bin Mamat M. J. Application of 3D laser scanning technology for mapping and accuracy assessment of the point cloud model for the Great Achievement Palace heritage building. Heritage Science. 2024. Vol. 12. P. 1–17. DOI 10.1186/s40494-024-01252-y.
5. Milosz M., Kesik J., Abdullaev U. 3D scanning and modeling of highly detailed and geometrically complex historical architectural objects: the example of the Juma Mosque in Khiva (Uzbekistan). Heritage Science. 2024. Vol. 12. P. 1–14. DOI 10.1186/s40494-024-01207-3.
6. Bent G., Pfaff D., Brooks M., Radpour R., Delaney J. A practical workflow for the 3D reconstruction of complex historic sites and their decorative interiors: Florence As It Was and the church of Orsanmichele. Heritage Science. 2022. Vol. 10. P. 1–17. DOI 10.1186/s40494-022-00750-1.
7. Кучинская Г., Ставская М. Применение наземного лазерного сканирования в современных условиях. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. Т. 1. С. 160–169. DOI 10.25018/0236-1493-2021-1-0-160-169.

8. Kuznetsova I., Kuznetsova D., Rakova X. The Use of Surface Laser Scanning for Creation of a ThreeDimensional Digital Model of Monument. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 100. P. 1625-1633. DOI 10.1186/s40494-022-00750-1.
9. Барышев А. И., Кузнецов Т. И., Покровская Е. А. Применение лазерного сканирования для определения напряженно-деформированного состояния трубных секций и интерпретации дефектов геометрии. *Нефтяное хозяйство*. 2022. Т. 12. С. 144–148. DOI 10.24887/0028-2448-2025-12-144-148.
10. Долгополов Д. В., Кузнецов Т. И., Ахундов А. Г., Барышев А. И., Мелкий В. А. Построение трехмерных моделей объектов магистрального трубопровода по данным лазерного сканирования для формирования границы отвода земель. *Вестник СГУГиТ*. 2025. Т. 30, № 4. С. 117–130. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-117-130.
11. Adami A., Guerra F., Vernier P. Laser scanner and architectural accuracy text. XXI International CIPA Symposium. 2007. P. 7–11.
12. Liu J., Zhang Q., Wu J., Zhao Y. Dimensional accuracy and structural performance assessment of spatial structure components using 3D laser scanning. *Automation in Construction*. 2018. Vol. 96. P. 324–336. DOI 10.1016/j.autcon.2018.09.026.
13. Antova G. Evaluation of Factors, Influencing the Accuracy of the Digital Model, Obtained by Laser Scanning. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 362. P. 12129–12137. DOI 10.1088/1755-1315/362/1/012129.
14. Комиссаров А. В. Классификация погрешностей в результатах лазерного сканирования. *Геодезия и картография*. 2015. Т. 10. С. 13–18. DOI 10.22389/0016-7126-2015-904-10-13-18.
15. Abiola D., Che E., Olsen M. Data-driven and scale-variant 3D accuracy assessment of terrestrial laser scanning data. *Measurement*. 2026. Vol. 275. P. 121254. DOI 10.1016/j.measurement.2026.121254.
16. Pawlowicz J. Effect of geometrical features various objects on the data quality obtained with measured by TLS. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 227. P. 012093. DOI 10.1088/1757-899X/227/1/012093.
17. Razali M. H., Idris A. N., Nor T. N. A. T. M., Ghazali R. Accuracy Assessment On Point Cloud Dataset from Terrestrial Laser Scanner with Different Objects Surface Properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 767. P. 012007. DOI 10.1088/1755-1315/767/1/012007.
18. Голубев В. В. Геодезия. Теория математической обработки геодезических измерений : учебник для вузов. М. : Изд-во МИИГАиК, 2016. 422 с.

REFERENCES

1. Piekarczyk A., Mazurek A., Szer J., Szer I. (2024). A Case Study of 3D Scanning Techniques in Civil Engineering Using the Terrestrial Laser Scanning Technique. *Buildings*, 14. DOI 10.3390/buildings14123703.
2. Novoselov D. B. (2022). The use of laser scanners in geodetic support of the construction of mining industrial enterprises. *Interexpo GEO-Siberia. [Interexpo GEO-Siberia]*, 1, 104-112. DOI 10.33764/2618-981X-2022-1-104-112 [in Russian].
3. Siwiec J., Lenda G. (2022). Integration of terrestrial laser scanning and structure from motion for the assessment of industrial chimney geometry. *Measurement*, 199. DOI 10.1016/j.measurement.2022.111404.
4. Liu S., Bin Mamat M. J. (2024). Application of 3D laser scanning technology for mapping and accuracy assessment of the point cloud model for the Great Achievement Palace heritage building. *Heritage Science*, 12. DOI 10.1186/s40494-024-01252-y.
5. Milosz M., Kesik J., Abdullaev U. (2024). 3D scanning and modeling of highly detailed and geometrically complex historical architectural objects: the example of the Juma Mosque in Khiva (Uzbekistan). *Heritage Science*, 12. DOI 10.1186/s40494-024-01207-3.
6. Bent G., Pfaff D., Brooks M., Radpour R., Delaney J. (2022). A practical workflow for the 3D reconstruction of complex historic sites and their decorative interiors: Florence As It Was and the church of Orsanmichele. *Heritage Science*, 10. DOI 10.1186/s40494-022-00750-1.
7. Kuchinskaya G., Stavskaya M. (2021). Modern applications of terrestrial laser scanning. *Mining informational and analytical bulletin [Mining informational and analytical bulletin]*, 1, 160-169. DOI 10.25018/0236-1493-2021-1-0-160-169 [in Russian].

8. Kuznetsova I., Kuznetsova D., Rakova X. (2015). The Use of Surface Laser Scanning for Creation of a ThreeDimensional Digital Model of Monument. *Procedia Engineering*, 100, 1625-1633. DOI 10.1186/s40494-022-00750-1.
9. Baryshev A. I., Kuznetsov T. I., Pokrovskaya E.A. (2022). Application of laser scanning to determine the stress-strain state of pipe sections and interpret geometry defects. *Oil Industry [Oil Industry]*, 12, 144–148. DOI 10.24887/0028-2448-2025-12-144-148 [in Russian].
10. Dolgoplov D. V., Kuznetsov T. I., Akhundov A. G., Baryshev A. I., Melkiy V. A. (2025). Three-dimensional geoinformation modeling of main pipeline facilities by laser scanning data to form the boundary of the allotment of land. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4 (30), 117–130. DOI 10.33764/2411-1759-2025-30-4-117-130 [in Russian].
11. Adami A., Guerra F., Vernier P. (2007). Laser scanner and architectural accuracy text. *XXI International CIPA Symposium*. Athens.
12. Liu J., Zhang Q., Wu J., Zhao Y. (2018). Dimensional accuracy and structural performance assessment of spatial structure components using 3D laser scanning. *Automation in Construction*, 96, 324–336. DOI 10.1016/j.autcon.2018.09.026.
13. Antova G. (2019). Evaluation of Factors, Influencing the Accuracy of the Digital Model, Obtained by Laser Scanning. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 362. DOI 10.1088/1755-1315/362/1/012129.
14. Komissarov A. V. (2015). The classification errors in the results of the laser scanning. *Geodesy and cartography [Geodesy and cartography]*, 10, 13–18. DOI 10.22389/0016-7126-2015-904-10-13-18 [in Russian].
15. Abiola D., Che E., Olsen M. (2026). Data-driven and scale-variant 3D accuracy assessment of terrestrial laser scanning data. *Measurement*, 275. DOI 10.1016/j.measurement.2026.121254.
16. Pawlowicz J. (2017). Effect of geometrical features various objects on the data quality obtained with measured by TLS. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 227. DOI 10.1088/1757-899X/227/1/012093.
17. Razali M. H., Idris A. N., Nor T. N. A. T. M., Ghazali R. (2021). Accuracy Assessment On Point Cloud Dataset from Terrestrial Laser Scanner with Different Objects Surface Properties. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 767. DOI 10.1088/1755-1315/767/1/012007.
18. Golubev V. V. (2016). *Геодези́я. Теори́я математическо́й обрабо́тки геодезическо́х изме́рений [The theoretical framework]*. Moscow: МПГАИК, 422 p. [in Russian].

Об авторах

Андрей Олегович Куприянов – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной геодезии.

Дмитрий Андреевич Морозов – старший преподаватель кафедры прикладной геодезии.

Дарья Сергеевна Мелихова – преподаватель кафедры прикладной геодезии, аспирант кафедры прикладной геодезии.

Павел Вячеславович Молоков – преподаватель кафедры прикладной геодезии.

Author details

Andrey O. Kupriyanov – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Applied Geodesy.

Dmitry A. Morozov – Senior Lecturer, Department of Applied Geodesy.

Darya S. Melikhova – Lecturer, PhD Student, Department of Applied Geodesy.

Pavel V. Molokov – Lecturer, Department of Applied Geodesy.

Получено / Received 19.08.2026

Поступила после рецензирования / Revised 31.08.2026

Принята к публикации / Accepted 09.09.2026