



Научно-исследовательская статья/Applied research article

УДК 528.721.222:528.71

<https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-8-18>

Контроль качества совмещения облаков точек наземного лазерного сканирования и наземной стереофотограмметрической съемки

Д. М. Искаков^{1✉}, М. А. Алтынцев¹

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

e-mail: d1skakov@yandex.ru

Аннотация. В статье выполнен сравнительный анализ методов С2С, С2М и М3С2 для контроля качества совмещения облаков точек, полученных с помощью наземного лазерного сканирования (НЛС) и наземной стереофотограмметрической съемки (НФС). Описаны теоретические основы методов и рассмотрен единый подход к подготовке данных для сравнения результатов их применения, включающий уравнивание в общей системе координат, фильтрацию шумов и артефактов, нормализацию плотности и выделение зоны взаимного перекрытия. На примере экспериментальных данных сформированы поля расстояний для каждого метода и рассчитан единый набор статистических показателей минимум, максимум, среднее арифметическое (μ), медиана (Me), среднеквадратичное значение (СКЗ), среднеквадратическое отклонение (СКО) и 95-й процентиль ($P95$), а также выполнен анализ распределений расстояний по гистограммам. Показано, что С2С и С2М обеспечивают близкие оценки типичных расхождений в зоне перекрытия и удобны для оперативного количественного контроля, тогда как М3С2 предоставляет физически интерпретируемую оценку смещения вдоль локальной нормали и позволяет выявлять систематические компоненты, но требует более тщательной параметризации и анализа проблемных зон.

Ключевые слова: облако точек, наземное лазерное сканирование, наземная стереофотограмметрическая съемка, С2С, С2М, М3С2, контроль качества

Для цитирования:

Искаков Д. М., Алтынцев М. А. Контроль качества совмещения облаков точек наземного лазерного сканирования и наземной стереофотограмметрической съемки. *Вестник СГУГиТ*. 2026. Т. 31, № 4. С. 8–18. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-8-18>

Comparative assessment of point cloud registration from terrestrial laser scanning and terrestrial stereophotogrammetry

D. M. Iskakov^{1✉}, M. A. Altyntsev¹

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

e-mail: d1skakov@yandex.ru

Abstract. The study provides a comparative assessment of the C2C, C2M, and M3C2 methods for quality control of point cloud co-registration derived from terrestrial laser scanning and terrestrial stereophotogrammetry. The theoretical basis of each method is outlined, and a unified preprocessing workflow is proposed for the comparison of their outputs, comprising transformation to a common coordinate system, removal of noise and artifacts, density normalization, and delineation of the mutual overlap zone. Experimental data were used to generate distance fields for each method and to compute a common set of descriptive statistics (Min, Max, Mean (μ), Median (Me), STD, RMS, and $P95$) together with histogram-based analysis of distance distributions. The results indicate that C2C and C2M yield closely comparable estimates of typical discrepancies within the overlap area and are well suited for rapid quantitative quality assessment, whereas M3C2 provides a physically interpretable estimate of displacement along the local surface normal and enables the detection of systematic offsets, albeit with greater sensitivity to parameterization and local data quality issues.

Keywords: point cloud, terrestrial laser scanning, terrestrial stereophotogrammetry, C2C, C2M, M3C2, quality control

For citation:

Iskakov D. M., Altyntsev M. A. (2026). Comparative assessment of point cloud registration from terrestrial laser scanning and terrestrial stereophotogrammetry. *Vestnik SSUGiT [Vestnik SSUGT]* Vol. 31, No. 4. pp. 8–18. <https://doi.org/10.33764/2411-1759-2026-31-4-8-18>

Введение

Совместное применение разнородных облаков точек в задачах обследования и цифровизации объектов строительства и промышленной инфраструктуры обусловлено необходимостью получения детальных геометрических характеристик таких объектов [1, 2]. Наземное лазерное сканирование обеспечивает высокую точность и стабильность геометрических измерений, однако на реальных объектах нередко формирует теневые зоны вследствие окклюзий и ограничений по размещению станций. Наземная стереофотограмметрическая съемка позволяет компенсировать теневые зоны и повысить полноту модели, но характеризуется неоднородной плотностью и точностью точек, зависящей от текстуры, освещенности и параметров обработки [3, 4].

При совмещении НЛС и НФС для построения ТИМ-моделей ключевым этапом становится количественная оценка расхождений между разнородными облаками и валидация корректности интеграции. Такая оценка зависит от выбора метрики сравнения.

Выбор метрики сравнения определяет достоверность вывода о качестве совмещения и допустимости применения объединенного облака в дальнейших инженерных задачах [5].

Наиболее распространенными подходами к оценке отклонений являются методы вычисления расстояний Cloud-to-Cloud (C2C),

Cloud-to-Mesh/Model (C2M) и Multiscale Model-to-Model Cloud Comparison (M3C2) [6, 7]. При одинаковом типе результата (поле расстояний) они различаются математической постановкой, чувствительностью к неоднородной дискретизации и шероховатости, а также интерпретируемостью оценок [8]. В условиях интеграции НЛС-НФС это критично: НЛС выступает опорным по точности, тогда как НФС дополняет геометрию, но может содержать локальные реконструктивные искажения.

Целью статьи является анализ точности совмещения облаков точек НЛС и НФС по зонам взаимного перекрытия с последующей выработкой практических рекомендаций по выбору оптимального метода вычисления расстояний или их сочетания при решении задач контроля качества результатов интеграции разнородных данных.

Задачи статьи:

- рассмотреть единый подход к подготовке данных НЛС и НФС для сравнения результатов применения методов C2C, C2M и M3C2 (фильтрация, прореживание, уравнивание, выбор зон сравнения);
- рассмотреть теоретические основы и принцип работы методов C2C, C2M и M3C2 в контексте сравнения облаков точек;
- выполнить анализ точности совмещения облаков НЛС и НФС методами C2C, C2M и M3C2, применяя набор статистических показателей (минимум, максимум, среднее

арифметическое (μ), медиана (Me), средне-квадратичное значение (СКЗ), среднеквадратическое отклонение (СКО) и 95-й процентиль ($P95$));

– проанализировать форму распределений и интерпретационные возможности результатов (выявление локальных артефактов, краевых эффектов перекрытия, признаков систематического смещения по нормали);

– сопоставить результаты трех методов и сформулировать практические рекомендации по выбору метода в задачах контроля качества интеграции НЛС-НФС и дальнейшего использования данных при построении/верификации ТИМ-модели.

Методы и материалы

Единый подход к подготовке данных НЛС и НФС с целью дальнейшего контроля качества совмещения разнородных облаков точек включает последовательное выполнение четырех процедур [9].

Во-первых, выполняется уравнивание облаков в единой системе координат, так как остаточные систематические смещения (сдвиг, поворот) напрямую искажают поле расстояний. На этом этапе фиксируют опорное облако (обычно НЛС) и обеспечивают достаточное перекрытие участков сравнения [10–12].

Во-вторых, проводят фильтрацию для удаления выбросов, шумов, динамических объектов и фотограмметрических артефактов (двойные поверхности, деформация формы), чтобы исключить вклад явно ошибочных измерений в статистику [3, 4].

В-третьих, при необходимости выполняют нормализацию плотности (прореживание) по единому правилу (например, сетка с шагом s), снижая влияние сверхплотных зон и обеспечивая сопоставимость статистик НЛС и НФС [2, 3].

В-четвертых, задают зоны сравнения: основную оценку проводят в зоне взаимного перекрытия, а области без перекрытия, границы видимости, окклюзии и участки резких переходов геометрии выделяют отдельно или исключают маской, поскольку там расстояния отражают дефицит данных, а не реальное расхождение [13, 14].

Такая схема подготовки предусматривает, что различия в результатах С2С, С2М и М3С2

обусловлены преимущественно особенностями самих методов вычисления расстояний, а не эффектами регистрации, шума или неоднородной плотности.

Метод С2С основан на принципе ближайшего соседа и задает расстояние от каждой точки сравниваемого облака до ближайшей точки опорного облака (рис. 1).

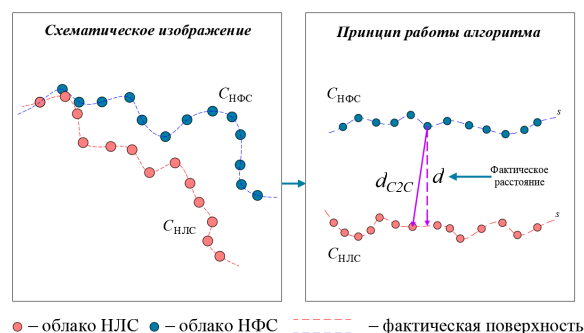


Рис. 1. Принцип вычисления расстояний методом С2С

Для точки $q_k^{НФС}$ расстояние определяется как минимальная евклидова норма:

$$d_{C2C}(q_k^{НФС}) = \min_j \|q_k^{НФС} - q_j^{НЛС}\|, \quad (1)$$

где $q_j^{НЛС}$ – точки опорного облака НЛС;
 $q_k^{НФС}$ – точка облака НФС.

Таким образом формируется скалярное поле $\{d_{C2C}(q_k^{НФС})\}$ на точках облака $С_{НФС}$, отражающее локальную близость двух дискретных выборок. Следует учитывать, что при существенных различиях плотности точек и наличии зон неполного перекрытия С2С может фиксировать не только геометрическое расхождение поверхностей, но и дискретизационные эффекты (удаленность ближайшего соседа вследствие прореживания или отсутствия данных) [3, 6, 14].

Метод С2М рассматривает сравнение как задачу «точка – поверхность», где опорная геометрия задана Mesh поверхностью $M_{НЛС}$, аппроксимирующей поверхность объекта $С_{НЛС}$, а $T_m \in M_{НЛС}$ – ее треугольники (рис. 2).

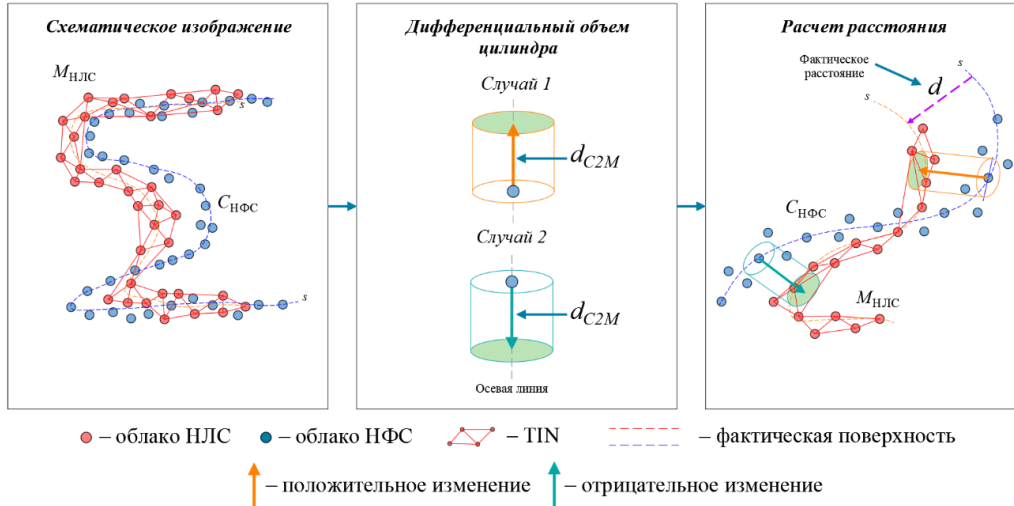


Рис. 2. Принцип вычисления расстояний методом C2M

Расстояние до поверхности определяется как минимум расстояний до всех треугольников:

$$d_{C2M}(q_k^{HFC}) = \min_{T_m \in M_{HLC}} dist(q_k^{HFC}, T_m), \quad (2)$$

где $dist(q_k^{HFC}, T_m)$ – кратчайшее расстояние от точки q_k^{HFC} до треугольника T_m (проекция на плоскость треугольника с учетом попадания внутрь треугольника; иначе – до ближайшего ребра/вершины) [15].

Метод МЗС2 относится к современным подходам сравнения облаков точек и вычисляет расстояния вдоль локальной нормали к поверхности опорного облака, что повышает корректность интерпретации смещений на

криволинейных и наклонных участках [7]. Принцип вычисления расстояний методом МЗС2 представлен на рис. 3.

Метод МЗС2 рассчитывает расстояния между облаками вдоль локальной нормали к поверхности, что особенно важно для сложных криволинейных элементов. В рамках методики облако НЛС выбирается в качестве опорного. Для каждой опорной точки p_i облака НЛС определяется локальная нормаль n_i :

$$z_{j,HLC} = (q_j^{HLC} - p_i) n_i; \quad (3)$$

$$z_{k,HFC} = (q_k^{HFC} - p_i) n_i. \quad (4)$$

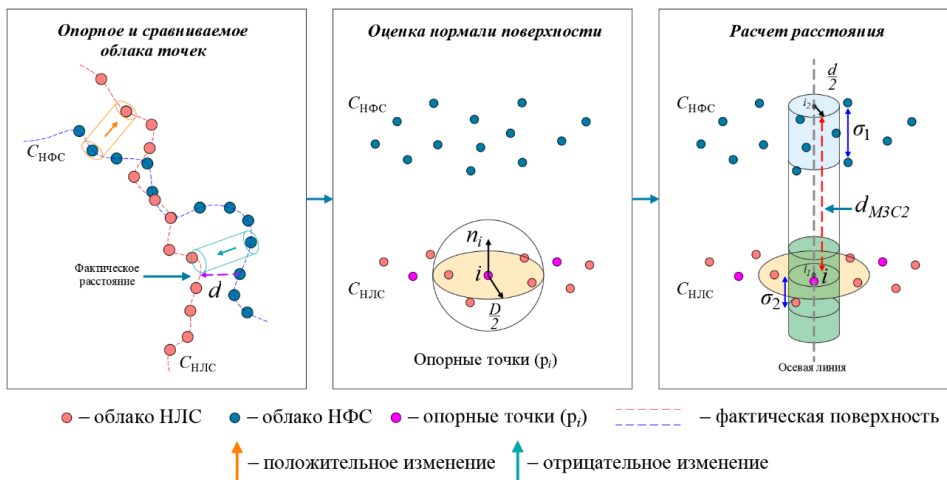


Рис. 3. Принцип вычисления расстояний методом МЗС2

Далее точки обоих облаков в цилиндрической окрестности проецируются на эту нормаль:

$$\bar{z}_{НЛС} = \frac{1}{N_{НЛС}} \sum_{j=1}^{N_{НЛС}} z_{j, НЛС}; \quad (5)$$

$$\bar{z}_{НФС} = \frac{1}{N_{НФС}} \sum_{k=1}^{N_{НФС}} z_{k, НФС}. \quad (6)$$

Смещение вдоль нормали между облаками в точке p_i определяется как

$$d_{МЗС2}(p_i) = \bar{z}_{НЛС} - \bar{z}_{НФС}, \quad (7)$$

где p_i – координаты опорной точки облака НЛС; $q_j^{НЛС}$, $q_k^{НФС}$ – точки опорного и сравниваемого облаков, попавшие в цилиндр вокруг p_i ; n_i – единичная локальная нормаль к поверхности, полученная по точкам опорного облака в сфере радиусом r ; $N_{НЛС}$, $N_{НФС}$ – число точек каждого облака в цилиндре; $d_{МЗС2}(p_i)$ – смещение вдоль нормали, $|d_{МЗС2}|$ характеризует модуль геометрического отклонения поверхностей) [7].

С целью анализа точности совмещения разнородных облаков точек, выполненного с помощью методов С2С, С2М и МЗС2, расчет выполнялся по единой выборке точек в зоне взаимного перекрытия облаков, что исключает влияние неперекрывающихся областей и краевых эффектов видимости на сводные показатели [5, 13, 14]. Для каждого метода $m \in \{С2С, С2М, МЗС2\}$ формировался набор расстояний $\{d_m(p_i)\}_{i=1}^N$, где p_i – точки выбранной области анализа, N – число точек, отобранных в зоне взаимного перекрытия облаков.

Расчет статистических показателей (μ/Me , СКО, СКЗ, $P95$,):

$$\mu_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_m(p_i); \quad (8)$$

$$Me_m = Q_{0.50}(\{d_m(p_i)\}_{i=1}^N); \quad (9)$$

$$P95_m = \left| Q_{0.95}(\{d_m(p_i)\}_{i=1}^N) \right|; \quad (10)$$

$$CKO_m = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_m(p_i) - \mu_m)^2}; \quad (11)$$

$$СКЗ_m = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d_m(p_i)^2}. \quad (12)$$

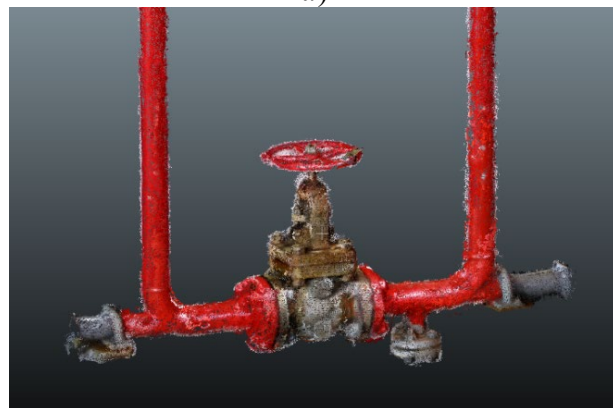
Такой набор метрик позволяет корректно сравнивать методы по центральным тенденциям (μ/Me), разбросу (СКЗ/СКО) и «хвостам» нормального распределения ($P95$ /максимум/минимум), не смешивая геометрические эффекты с зонами отсутствия данных [5, 13, 14].

Результаты

В ходе производственных работ получены исходные пространственные данные в виде облаков точек НЛС и НФС, обработанные и совмещенные по единой методике. На рис. 4 показаны исходные облака НЛС и НФС, иллюстрирующие различия в плотности, заполнении теневых зон и локальной детальности поверхностей.



a)



б)

Рис. 4. Облако точек: а) НЛС; б) НФС

После приведения данных к единой системе координат и унифицированной подготовки рассчитаны поля расстояний тремя методами: С2С, С2М и МЗС2.

Результаты С2С приведены на рис. 5 (карта отклонений) и рис. 6 (гистограмма). Дополнительно на рис. 5 и 7 представлены информационные метки выбранных точек, в которых отображаются локальные значения отклонений, координаты точек (X , Y , Z), компоненты нормали (N_x , N_y , N_z) и цветовые характеристики (R , G , B). Метод обеспечивает первичную оценку локальной близости облаков НЛС и НФС и позволяет быстро выявлять зоны повышенных расхождений [6, 14]. При интерпретации важно учитывать его чувствительность к неоднородной плотности и неполному перекрытию: рост расстояний типичен у границ видимости, на тонких/ребристых элементах и в зонах разрежения одного из облаков, поэтому такие аномалии следует трактовать как комбинацию факторов, а не как однозначную деформацию поверхности.

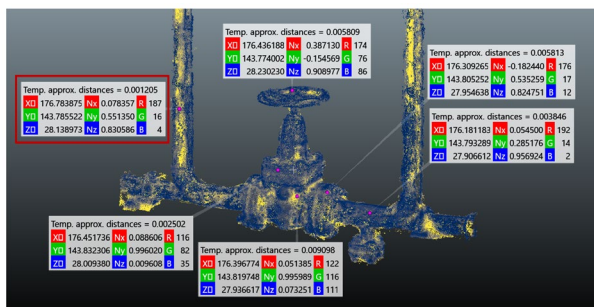


Рис. 5. Карта расстояний С2С между облаками НЛС и НФС

На рис. 5 – информационная метка выбранной точки.

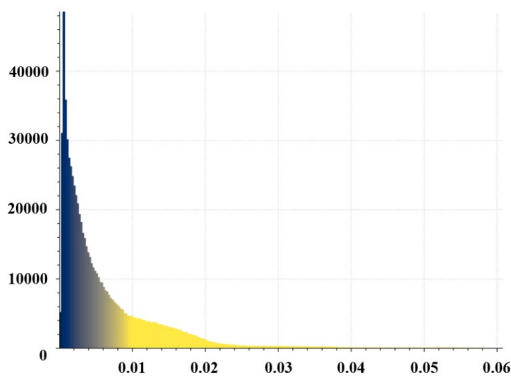


Рис. 6. Распределение расстояний С2С (гистограмма)

Гистограмма С2С характеризуется концентрацией расстояний у нуля и длинным правым хвостом: основная масса точек в зоне перекрытия хорошо согласована, а повышенные значения локальны. Хвост обусловлен особенностями ближайшего соседа и обычно связан с неоднородной плотностью, краями перекрытия, окклюзиями и сложной геометрией. Для общей оценки корректнее опираться на Me и $P95$, а максимум рассматривать как индикатор проблемных зон.

В С2М опорная геометрия задавалась Mesh, построенной по НЛС, после чего вычислялись расстояния «точка – поверхность» для облака НФС (рис. 7, а). По сравнению с С2С метод более интерпретируем, так как расстояние измеряется до непрерывной аппроксимации поверхности, однако результат зависит от качества опорной сетки: сглаживание, дефекты триангуляции и разрывы могут систематически искажать расстояния [15]. На практике наибольшие отклонения проявляются на перегибах, ребрах и в зонах, где топология сетки не соответствует реальной геометрии объекта.

Метод МЗС2 применен для вычисления расстояний между облаками вдоль локальной нормали к поверхности опорного облака НЛС. Результат представлен на рис. 7, б. В выполненной постановке параметры МЗС2 принимались: $D = 0,025898$ м, $h_{MAX} = 0,129492$ м; в качестве опорных точек использовались точки облака НЛС. Такой подход обеспечивает измерение расстояний в направлении, согласованном с локальной геометрией поверхности, что особенно важно при анализе наклонных и криволинейных элементов. При интерпретации результатов следует учитывать, что устойчивость МЗС2 определяется корректностью оценки локальных нормалей и достаточностью точек в цилиндрической окрестности: на ребрах, тонких элементах и в зонах неполного перекрытия возможны локальные артефакты/разброс значений.

Гистограммы распределения расстояний для методов С2М и МЗС2 представлены на рис. 8.

Гистограмма С2М имеет выраженный пик около нуля и хвосты в обе стороны, что указывает на хорошее согласование в зоне перекрытия при наличии локальных отклонений. Отрицательные и положительные значения отражают направление смещения относительно нормали поверхности (связано с ориентацией нормалей, локальной геометрией и качеством аппроксимации Mesh). Для общей оценки корректнее опираться на Me и $P95$ по $|d|$, а экс-

тремальные значения рассматривать как индикатор проблемных участков (ребра/тонкие элементы, локальные дефекты сетки, окклюзии).

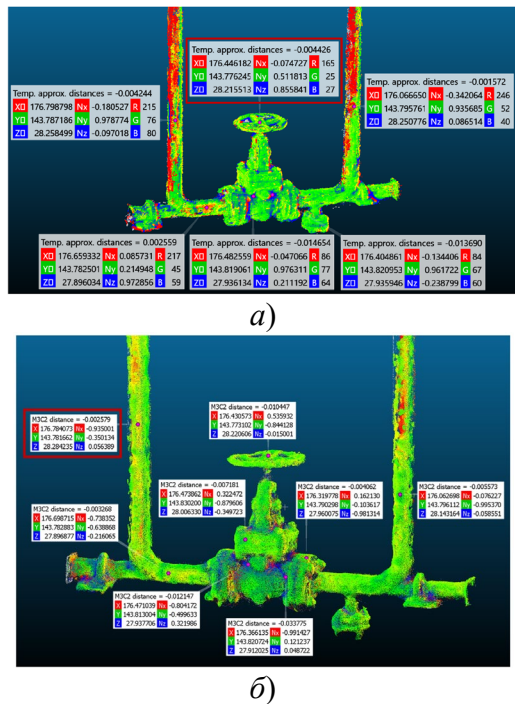


Рис. 7. Карта расстояний между облаками НЛС и НФС: а) С2М; б) М3С2; – информационная метка выбранной точки

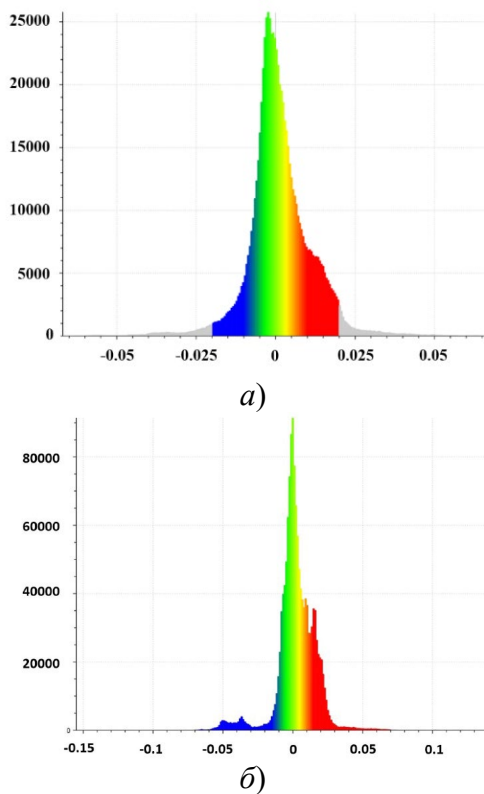


Рис. 8. Распределение расстояний С2М и М3С2: а) С2М; б) М3С2

Гистограмма М3С2 показывает выраженную концентрацию значений около нуля и наличие как положительных, так и отрицательных отклонений: в зоне перекрытия большинство точек демонстрирует небольшие смещения, а знак расстояния отражает направление расхождения вдоль локальной нормали. Расширение распределения и хвосты формируются из-за чувствительности метода к оценке нормалей и параметрам локальных окрестностей (масштаб D , диаметр проекции d , глубина), а также из-за окклюзий, ребер и тонких элементов, где нормаль и локальная выборка точек менее устойчивы [7]. Для общей оценки целесообразно использовать Me и $P95$ по $|d|$, а экстремальные значения интерпретировать как индикатор локальных проблемных зон и параметрических артефактов.

Заключение

С целью контроля качества совмещения разнородных облаков точек, выполненного по трем методам, по зонам их взаимного перекрытия был рассчитан набор статистических показателей (минимум, максимум, μ , Me , СКЗ, СКО, $P95$). Объем контрольной выборки определялся на основе анализа устойчивости статистических показателей при последовательном увеличении числа точек. По результатам сопоставления установлено, что начиная с $N=30\,402$ изменения основных метрик носят несущественный характер, что свидетельствует о стабилизации статистической оценки. Поэтому для дальнейшего сравнительного анализа была принята единая контрольная выборка объемом $N=30\,402$ точки. Для метода С2С анализировались беззнаковые расстояния, тогда как для методов С2М и М3С2 показатели (μ , Me , СКО, СКЗ) рассчитывались по знаковым расстояниям d . Гистограммы построены по полю расстояний в зоне перекрытия, а сводные метрики рассчитаны по выборке $N=30\,402$ точек из той же области. Сводные значения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Сводные статистические показатели расстояний для методов С2С, С2М и М3С2

Метод	N	Мин., м	Макс., м	μ , м	Me , м	СКО, м	СКЗ, м	$P95$, м
С2С	30402	0,000	0,035	0,004	0,002	0,004	0,005	0,012
С2М	30402	-0,034	0,039	0,001	0,001	0,003	0,003	0,004
М3С2	30376	-0,020	0,019	0,000	0,000	0,005	0,005	0,009

*Примечание – для метода М3С2 в столбце N указано число валидных опорных точек, по которым фактически были получены значения расстояний.

Анализ сводных статистических показателей демонстрирует, что для С2С распределение расстояний имеет выраженную концентрацию около нуля и правосторонний хвост: $\mu = 0,004$ м и $Me = 0,002$ м соответствуют типичным расхождениям порядка 2–4 мм, тогда как $P95 = 0,012$ м указывает, что 95 % точек имеют отклонения не более 12 мм; максимум = 0,035 м характеризует редкие локальные зоны повышенных расхождений, обусловленные неоднородностью плотности и особенностями ближайшего соседа на границах перекрытия, в зонах окклюзий и сложной геометрии.

Для С2М распределение имеет пик около нуля и хвосты в обе стороны, что соответствует знаковой природе расстояния относительно нормали Mesh: близость $\mu = 0,001$ м и $Me = 0,001$ м к нулю свидетельствует об отсутствии выраженного систематического смещения по нормали, при этом $P95 = 0,004$ м подтверждает, что 95 % значений по модулю не превышают 4 мм; минимум = -0,034 м и максимум = 0,039 м интерпретируются как локальные проблемные зоны (ребра, тонкие элементы, окклюзии) и участки, где качество аппроксимации поверхности или ориентация нормалей приводит к увеличению расстояний.

Для М3С2 распределение также является двусторонним, однако по величине разброса оно занимает промежуточное положение между С2С и С2М. Значения $\mu = 0,000$ м, $Me = 0,000$ м свидетельствуют об отсутствии систематического смещения вдоль нормали.

При этом СКЗ = 0,005 м и СКО = 0,005 м, а также $P95 = 0,009$ м свидетельствуют о более широком распределении по сравнению с С2М, но меньшем разбросе по сравнению с С2С. Значения минимум = -0,020 м и максимум = 0,019 м характеризуют локальные участки повышенных расхождений, что отражает чувствительность метода к устойчивости локальных нормалей, параметрам окрестностей и полноте описания сложных поверхностей.

В целом С2С и М3С2 дают сопоставимую оценку согласования (миллиметровый уровень типичных расхождений, $P95$ порядка 1 см), тогда как С2М характеризуется более компактным распределением расстояний и наименьшим разбросом. При этом М3С2 обеспечивает физически более интерпретируемое измерение вдоль локальной нормали и лучше выявляет локальные смещения, но требует более тщательного подбора параметров и отдельного анализа зон, формирующих хвосты распределения [3, 6, 7, 14–16].

В целом С2С удобен как быстрый индикатор расхождений, но чаще «раздувается» на границах перекрытия и при различной плотности; С2М стабилен на гладких участках при качественной Mesh; М3С2 лучше отражает отклонения на наклонных/криволинейных элементах, но требует аккуратной интерпретации у ребер и при дефиците точек в проекционном окне. Итоговая применимость формируется по картам отклонений, форме распределений и сводным статистикам (табл. 1); сравнительный анализ методов приведен в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительный анализ методов

Этап / задача	Метод	Контроль по метрикам/гистограмме	Интерпретация
Быстрая проверка качества совмещения НЛС и НФС	C2C	Me , $P95$, форма гистограммы	Пик у 0 – основная масса согласована; длинный хвост – локальные проблемы (края перекрытия, разная плотность, окклюзии)
Подготовка к ТИМ (сравнение с опорной поверхностью)	C2M	Me , $P95$, симметрия хвостов	Двусторонние хвосты чаще связаны с качеством Mesh (сглаживание/разрывы) плюс локальная геометрия
Выявление систематики и смещения вдоль поверхности	M3C2	μ/Me (знак), $P95$, СКЗ/СКО	Ненулевой μ/Me – возможное систематическое смещение вдоль нормалей; высокий $P95/СКЗ$ → чувствительность к нормалям/масштабам окрестности, проблемные зоны геометрии
Итоговый критерий пригодности для ТИМ	C2M + M3C2	Me , $P95$, Макс./Мин. (индикатор дефектов)	$Me/P95$ описывают обычное расхождение; Макс./Мин. почти всегда локальны и не должны влиять на общий вывод
Контроль эффективности предобработки (фильтрация/прореживание/маска)	C2C (быстро), затем C2M/M3C2	Me и $P95$	Улучшение должно проявляться прежде всего в $P95$ и форме хвоста

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Алтынцев М. А., Карпик П. А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования. Вестник СГУГиТ. 2020. Т. 25, № 2. С. 121–139. DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-2-121-139.
2. Mukupa W., Roberts G. W., Hancock C. M., Al-Manasir K. A. A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. Survey Review. 2017. Vol. 49, No. 353. P. 99–116. DOI: 10.1080/00396265.2015.1133039.
3. Qin R., Tian J., Reinartz P. 3D change detection – approaches and applications. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. Vol. 122. P. 41–56. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.09.013.
4. Shafaat O. Bin. Change Detection of Urban Vegetation from Terrestrial Laser Scanning and Drone Photogrammetry: Master's Thesis. Espoo: Aalto University, School of Engineering, Department of Built Environment, 2023. 119 p.
5. Fey C., Wichmann V. Long-range terrestrial laser scanning for geomorphological change detection in alpine terrain – handling uncertainties. Earth Surface Processes and Landforms. 2017. Vol. 42, No. 5. P. 789–802. DOI: 10.1002/esp.4022.
6. Shen Y., Lindenbergh R., Wang J. Change Analysis in Structural Laser Scanning Point Clouds: The Baseline Method. Sensors. 2017. Vol. 17, No. 1. Art. 26. DOI: 10.3390/s17010026.
7. Lague D., Brodu N., Leroux J. Multiscale model to model cloud comparison: a 3D point cloud comparison method for deformation analysis. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2013. Vol. 82. P. 10–25. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
8. Alibekov U., Staderini V., Ramachandran G., Schneider P., Antensteiner D. Evaluation of 3D Point Cloud Distances: A Comparative Study in Multi-Point Cloud Fusion Environments. Proceedings of the 19th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2024). Vol. 4: VISAPP. 2024. P. 59–71. DOI: 10.5220/0012421300003660.
9. Середович В. А., Комиссаров А. В., Комиссаров Д. В., Широкова Т. А. Наземное лазерное сканирование : монография. Новосибирск : СГГА, 2009. 261 с.
10. Besl P. J., McKay N. D. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 1992. Vol. 14, No. 2. P. 239–256. DOI: 10.1109/34.121791.
11. Rusinkiewicz S., Levoy M. Efficient variants of the ICP algorithm. Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2001). 2001. P. 145–152.

12. Ahmad Fuad N., Yusoff A. R., Ismail Z., Majid Z. Comparing the Performance of Point Cloud Registration Methods for Landslide Monitoring Using Mobile Laser Scanning Data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2018. Vol. XLII-4/W9. P. 11–21. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.
13. Nourbakhshbeidokhti S., Kinoshita A. M., Chin A., Florsheim J. L. A Workflow to Estimate Topographic and Volumetric Changes and Errors in Channel Sedimentation after Disturbance. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11. Art. 586. DOI: 10.3390/rs11050586.
14. Barnhart T. B., Crosby B. T. Comparing Two Methods of Surface Change Detection on an Evolving Thermokarst Using High-Temporal-Frequency Terrestrial Laser Scanning, Selawik River, Alaska. *Remote Sensing*. 2013. Vol. 5, No. 6. P. 2813–2837. DOI: 10.3390/rs5062813.

REFERENCES

1. Altyntsev, M. A., & Karpik, P. A. (2020). Methodology for creating digital three-dimensional models of infrastructure facilities of oil and gas production complexes using ground-based laser scanning *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, VOL 25(2), 121–139. DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-2-121-139 [in Russian].
2. Mukupa, W., Roberts, G. W., Hancock, C. M., & Al-Manasir, K. A. (2017). A review of the use of terrestrial laser scanning application for change detection and deformation monitoring of structures. *Survey Review*, 49(353), 99–116. DOI 10.1080/00396265.2015.1133039.
3. Qin, R., Tian, J., & Reinartz, P. (2016). 3D change detection—Approaches and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 122, 41–56. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2016.09.013.
4. Shafaat, O. B. (2023). Change detection of urban vegetation from terrestrial laser scanning and drone photogrammetry. Master's thesis. Espoo: Aalto University, School of Engineering, Department of Built Environment, 119 p.
5. Fey, C., & Wichmann, V. (2017). Long-range terrestrial laser scanning for geomorphological change detection in alpine terrain—Handling uncertainties. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(5), 789–802. DOI 10.1002/esp.4022.
6. Shen, Y., Lindenbergh, R., & Wang, J. (2017). Change analysis in structural laser scanning point clouds: The baseline method. *Sensors*, 17(1), Article 26. DOI 10.3390/s17010026.
7. Lague, D., Brodu, N., & Leroux, J. (2013). Multiscale model to model cloud comparison: A 3D point cloud comparison method for deformation analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 82, 10–25. DOI 10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009.
8. Alibekov, U., Staderini, V., Ramachandran, G., Schneider, P., & Antensteiner, D. (2024). Evaluation of 3D point cloud distances: A comparative study in multi-point cloud fusion environments. In *Proceedings of the 19th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2024)*, Vol. 4: VISAPP (pp. 59–71). DOI 10.5220/0012421300003660.
9. Seredovich, V. A., Komissarov, A. V., Komissarov, D. V., & Shirokova, T. A. (2009). Nazemnoe lazernoe skanirovanie: monografiya [*Terrestrial laser scanning: a monograph*]. Novosibirsk: SGGA Publ., 261 p. [in Russian].
10. Besl, P. J., & McKay, N. D. (1992). A method for registration of 3-D shapes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14(2), 239–256. DOI 10.1109/34.121791.
11. Rusinkiewicz, S., & Levoy, M. (2001). Efficient variants of the ICP algorithm. In *Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2001)* (pp. 145–152).
12. Ahmad Fuad, N., Yusoff, A. R., Ismail, Z., & Majid, Z. (2018). Comparing the performance of point cloud registration methods for landslide monitoring using mobile laser scanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-4/W9, 11–21. DOI 10.5194/isprs-archives-XLII-4-W9-11-2018.

13. Nourbakhshbeidokhti, S., Kinoshita, A. M., Chin, A., & Florsheim, J. L. (2019). A workflow to estimate topographic and volumetric changes and errors in channel sedimentation after disturbance. *Remote Sensing*, 11, Article 586. DOI 10.3390/rs11050586.

14. Barnhart, T. B., & Crosby, B. T. (2013). Comparing two methods of surface change detection on an evolving thermokarst using high-temporal-frequency terrestrial laser scanning, Selawik River, Alaska. *Remote Sensing*, 5(6), 2813–2837. DOI 10.3390/rs5062813.

Об авторах

Диас Мейрамович Искаков – аспирант кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Максим Александрович Алтынцев – доктор технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной геодезии и маркшейдерского дела.

Authors details

Dias M. Iskakov – PhD. Student, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Maksim A. Altyntsev – D.Sc, Associate Professor, Department of Engineering Geodesy and Mine Surveying.

Получено / Received 17.02.2026

Поступила после рецензирования / Revised 16.03.2026

Принята к публикации / Accepted 17.05.2026