Алгоритмы векторной обработки данных лазерного сканирования объектов на земной поверхности для комплексирования со спутниковыми данными

А. Б. Мурынин[1], А. А. Рихтер[2]

[1] *Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН*
Москва, 119333, Россия
E-mail: amurynin@bk.ru
[2] *АО «Тазмар Айти-Солюшнз», Санкт-Петербург, 195160, Россия*

Представлен метод векторизации данных лазерного сканирования (облаков точек) антропогенных объектов, ориентированный на автоматизированное построение интерпретируемых геометрических моделей дорожной инфраструктуры. Подход базируется на комплексировании данных наземного лазерного сканирования со спутниковыми и картографическими данными. Предложена многоэтапная схема обработки, включающая предобработку и фильтрацию облаков точек, их декомпозицию на связные компоненты с использованием методов кластеризации, векторизацию выделенных элементов на основе операций вычислительной геометрии и морфологического анализа, а также последующий расчёт геометрических параметров объектов. Особое внимание уделено обработке линейно-протяжённых объектов (автомобильных дорог): разработаны алгоритмы выделения осевых линий, границ полотна и обочин, а также методы продольного и поперечного зонирования для структурирования пространства. Эффективность предложенных решений продемонстрирована на примере сегментации и построения геометрических моделей дорожных опор с оценкой точности по гистограммам отклонений. Алгоритмическая и программная реализация базируется на использовании открытых инструментов, что обеспечивает воспроизводимость результатов.

Ключевые слова: облако точек, лазерное сканирование, лидар, векторизация, дистанционное зондирование, морфологический анализ, вычислительная геометрия, дорожная инфраструктура, геометрическая модель

Одобрена к печати: 02.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-35-49

Введение

Современные методы дистанционного зондирования Земли, и в особенности технологии лазерного сканирования (лидар), предоставляют уникальную возможность получения высокодетальной трёхмерной информации о земной поверхности и расположенных на ней объектах. Данные, представленные в виде облаков точек, находят широкое применение при решении задач мониторинга состояния дорожной инфраструктуры, городского планирования, создания цифровых двойников и инвентаризации объектов капитального строительства (Миронюк и др., 2023; Щербаков и др., 2024; He, Li, 2020; Julge et al., 2019; Pradhan, Sameen, 2020; Vu, Thanh, 2020).

В публикации (Щербаков и др., 2024) представлена система мобильного лазерного сканирования, предназначенная для комплексного обследования железных и автомобильных дорог. Предложен метод автоматического выделения рельсов и дорожной разметки из облака точек.

Работа (Миронюк и др., 2023) посвящена нормативно-методическому обеспечению лазерного сканирования автомобильных дорог в России. Предложена методика калибровки и верификации данных мобильного лазерного сканирования с использованием контрольных точек. Разработана классификация объектов, подлежащих автоматическому распознаванию (разметка, знаки, бордюры, люки, трещины). Даны рекомендации по составу выходной документации (продольные/поперечные профили, карты дефектов, трёхмерные модели).

Работа (Vu, Thanh, 2024) посвящена применению мобильного лидара для мониторинга состояния дорожного покрытия на тестовом участке. Автоматически выявлены выбоины, колея, трещины и неровности с порогом обнаружения 3 мм по глубине. Разработан алгоритм расчёта международного индекса ровности IRI (*англ.* International Roughness Index) по лидарным данным.

Исследование (Julge et al., 2019) посвящено применению беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) с лазерным сканером или фотограмметрией для мониторинга земляных работ при строительстве дорог. Использованы три метода: наземное лазерное сканирование, БПЛА-лазерное сканирование и фотограмметрия по снимкам с БПЛА. Предложен метод автоматического вычисления разности цифровых моделей рельефа (*англ.* DEM (Digital Elevation Model) of Difference) для контроля выполнения проекта.

В работе (He, Li, 2020) исследуется применение технологии лидар (наземный и воздушный) для кадастрового учёта и картографирования. Предложен алгоритм автоматического выделения зданий, заборов, опор ЛЭП из облака точек для кадастровых планов. Показано, что лидар позволяет детектировать объекты, скрытые под растительностью (в режиме «многократных отражений»).

Высокая плотность и точность лидарных измерений позволяют фиксировать мельчайшие геометрические детали, что делает этот метод незаменимым при обследовании сложных антропогенных объектов. Однако неструктурированный характер исходных облаков точек, их огромный объём (миллиарды точек для протяжённых участков), наличие шумов и разнородность сцен создают значительные трудности для автоматизированного анализа. Процесс перехода от сырых данных к формализованным векторным моделям, пригодным для загрузки в геоинформационные системы или системы автоматизированного проектирования, требует разработки специализированных методов обработки.

Существующие подходы часто либо ориентированы на ручную векторизацию, что крайне трудоёмко, либо используют узкоспециализированные алгоритмы, не учитывающие структурные особенности различных классов объектов. В связи с этим актуальной становится задача создания комплексной методологии, обеспечивающей автоматизированное выделение, классификацию и векторизацию объектов дорожной инфраструктуры по данным лазерного сканирования (Евтюков, Перевалов, 2018; Мотуз, Сарычев, 2014).

В настоящей работе предлагается подход к извлечению геометрической информации по облакам точек наблюдаемых объектов (на примере объектов придорожной инфраструктуры). В отличие от многих других подходов, в данном подходе: 1) не задействованы меш-модели, ввиду геометрической сложности таких моделей и наличия в них большого количества неинформативных участков; 2) большая информативность моделей объектов обеспечивается оперированием баундбоксами (*англ.* bounding box) как наиболее простой и эффективной при расчётах характеристикой облаков точек; 3) применяется многоцикловое разложение облака точек дороги на участки (баундбоксы и их облака точек) и их слияние для сегментации объектов интереса. Предлагаемые алгоритмы векторизации данных лазерного сканирования имеют ряд особенностей, которые описаны ниже.

Описание метода обработки облаков точек, формируемых при сканировании дорог и придорожной инфраструктуры

Разработанный метод представляет собой многостадийный процесс, направленный на последовательное преобразование исходного неструктурированного облака точек в формализованную векторную модель. Общая схема метода, иллюстрирующая ключевые этапы и потоки данных, представлена на *рис. 1.* Методология базируется на принципах декомпозиции сложной сцены, независимой обработки выделенных фрагментов и последующей агрегации результатов с использованием операций вычислительной геометрии и морфологического анализа. На разных стадиях обработки применяются группы операций над облачной, растровой и векторной информацией, часть из которых разработана. Данные группы операций имеют алгоритмическую и программную реализацию, которая базируется на CloudCompare

и CloudComPy (https://www.simulation.openfields.fr/documentation/CloudComPy/html). CloudCompare — программное обеспечение для обработки облаков точек, например, полученных с помощью лазерного сканера, а также треугольных сеток и откалиброванных изображений. CloudComPy — Python-обёртка для инструмента CloudCompare, которая позволяет взаимодействовать с ним через Python-интерфейс и предоставляет доступ к функциям CloudCompare.

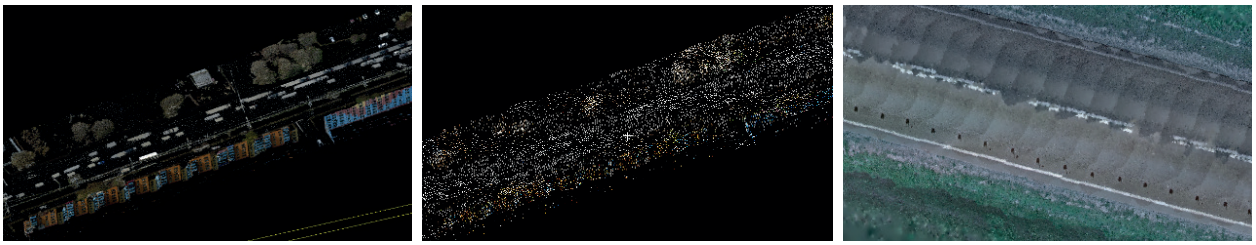
Опишем стадии процесса обработки.



Рис. 1. Общая схема сегментации и векторизации объектов дорожной инфраструктуры по облаку точек

Предобработка исходного облака точек

Процесс векторизации начинается с этапа подготовки сырых данных лазерного сканирования. Исходное облако точек, как правило, содержит шумы, избыточную плотность и разнородные объекты, что делает его непригодным для непосредственного анализа. В связи с этим первая стадия предлагаемого метода посвящена предобработке и декомпозиции облака точек области интереса.



а *б* *в*

Рис. 2. Визуальное представление типовых форм предобработки облака точек: *а* — пространственная фильтрация; *б* — сэмплирование; *в* — растрирование на фрагменте

На *рис. 2* показаны типы предобработки облаков точек, получаемых при сканировании дороги и придорожной инфраструктуры:

А. Фильтрация и нормализация.

Первоочередная задача заключается в очистке данных от артефактов и выделении значимых компонентов. Для этого применяется ряд алгоритмов фильтрации, направленных на удаление выбросов и отделение объектов интереса от фона. Например, на *рис. 2а* проиллюстрирован результат пространственной фильтрации фрагмента городской сцены, где было произведено выделение надземной части (зданий, столбов, крон деревьев) с исключением земной поверхности и низкорослой растительности;

Б. Оптимизация плотности данных (семплирование).

Высокая плотность современных лидарных съёмок, с одной стороны, обеспечивает детализацию, но с другой — создаёт избыточную вычислительную нагрузку. Для достижения баланса между информативностью и производительностью выполняется процедура семплинга. Как показано на *рис. 2б*, этот процесс позволяет равномерно уменьшить плотность облака точек, сохраняя при этом ключевые геометрические особенности объектов (например, форму фасада или дорожного ограждения). Это критически важно для ускорения последующих этапов кластеризации и аппроксимации.

В. Растрирование.

Для интеграции с методами обработки изображений и улучшения визуального контроля выполняется растрирование облака точек. Суть метода заключается в проецировании трёхмерных точек на горизонтальную плоскость с последующим формированием регулярной сетки (растра). На *рис. 2в* представлен результат растрирования с малым шагом маски, что позволяет получить полутоновое изображение местности, где интенсивности пикселя соответствует отражательная способность в точке земной поверхности (чем выше интенсивность, тем лучше отражательная способность). Такое представление удобно для быстрого выделения крупных объектов и их границ.

Зонирование дороги

Дороги — линейно-протяжённые объекты, имеющие большие размеры растров и облаков точек и определённую специфику их векторизации. В связи с этим проводится зонирование дороги — разделение её пространства на функциональные участки (зоны) для последующего анализа. Для этого применяются процедуры тайлирования, векторизации растров, морфологической обработки растровых и векторных данных, а также вычислительной геометрии (Овермарс и др., 2017; Сойфер, 2003; Уймин, Греков, 2024; Cheong et al., 2006; Knyaz et al., 2025; Murynin et al., 2025; Vorobyev et al., 2024).

Детальное рассмотрение алгоритмов зонирования дороги выходит за рамки настоящей статьи и будет представлено авторами в последующих работах.

Разложение облака точек на связные компоненты

Многоцикловое разложение облака точек дороги на связные компоненты состоит из трёх вложенных циклов разложения, позволяет постепенно повышать детализацию и переходить от общего к частному и производится в соответствии со схемой, показанной на *рис. 3*.

Цикл 1 — тайлирование по зонам (горизонтальная декомпозиция).

На первом уровне происходит горизонтальное разделение пространства на облачные тайлы — информативные участки облака точек, «вырезанные» по зонам как по ограничивающим полигонам. Это самый грубый уровень разделения, цель которого – разбить протяжённую сцену (километры дороги) на локальные участки, которые можно обрабатывать независимо друг от друга.

Цикл 2 — послойное разложение (вертикальная декомпозиция).

Каждый полученный облачный тайл подвергается дальнейшему анализу по вертикальной координате — высоте. Облако разделяется на горизонтальные облачные слои. Такое разло-

жение позволяет различать объекты, имеющие разную высотность (соответствующие физическим классам объектов, которые редко пересекаются по высоте). Например, разложение на следующие участки пространства: приземный слой (0–0,5 м) — содержатся точки дорожного покрытия, бордюров, нижних частей ограждений; средний слой (0,5–2,5 м) — включает дорожные знаки, капоты автомобилей, кустарники; верхний слой (>2,5 м) — отображаются кроны деревьев, верхушки столбов освещения, фасады зданий (если они попадают в зону).

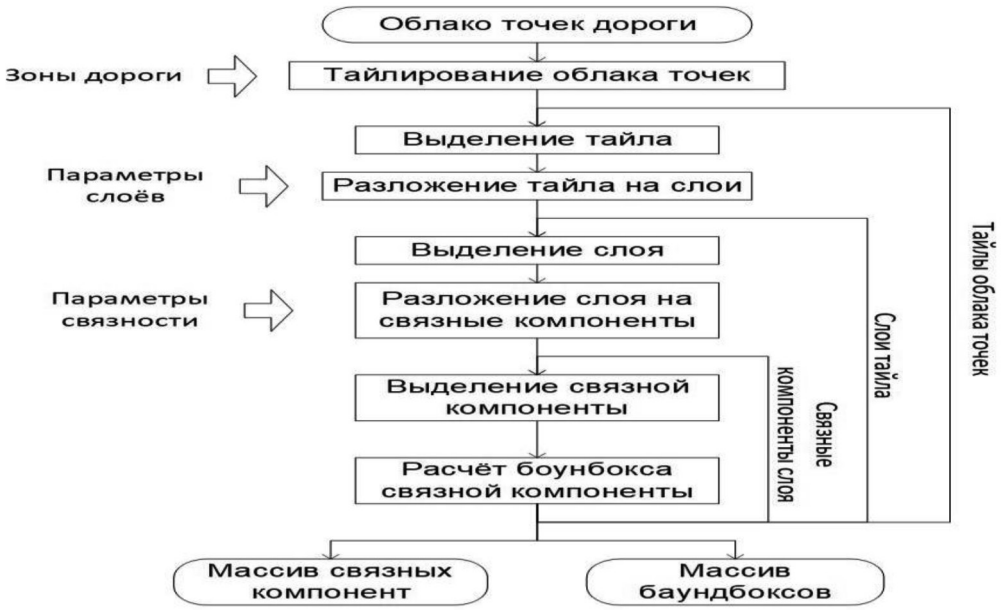


Рис. 3. Схема разложения облака точек на связные компоненты

Цикл 3 — пообъектное разложение (объектная декомпозиция).

Внутри каждого высотного слоя запускается «тонкий» уровень разложения. Каждый слой раскладывается на связные компоненты. Здесь применяются алгоритмы облачной кластеризации (Kaňuk et al., 2019), которые группируют близко расположенные точки в пространстве в отдельные кластеры — облака точек связных компонент. Каждому облаку точек связной компоненты соответствует свой баундбокс (баундбокс связной компоненты).

Баундбокс облака точек — прямоугольный параллелепипед минимальных размеров, ориентированный гранями параллельно координатным плоскостям, внутри которого лежат все точки этого облака (https://www.ultralytics.com). Математически баундбокс можно представить в виде:

$$B = \left[\left(x_{\min}, x_{\max}\right), \left(y_{\min}, y_{\max}\right), \left(z_{\min}, z_{\max}\right)\right],$$

$$x_{\min} = \min_i x_i, \quad x_{\max} = \max_i x_i,$$

$$y_{\min} = \min_i y_i, \quad y_{\max} = \max_i y_i,$$

$$z_{\min} = \min_i z_i, \quad z_{\max} = \max_i z_i,$$

$$p_i = \left(x_i, y_i, z_i\right) \in C, \quad i = 1 \ldots n,$$

где B — баундбокс облака точек $C = \left\{\left(x_i, y_i, z_i\right)\right\}_{i=1}^{n}$; p_i — точки облака; n — число точек облака (размер облака); $\left(x_{\min}, x_{\max}\right)$ — нижняя и верхняя границы баундбокса по абсциссе, $\left(y_{\min}, y_{\max}\right)$ — по ординате, $\left(z_{\min}, z_{\max}\right)$ — по аппликате.

В результате такого разложения формируется массив облаков точек связных компонент и соответствующий массив баундбоксов связных компонент, скоординированных по циклам 1–3.

Обработка облаков точек связных компонент и их баундбоксов

Для баундбокса связной компоненты фиксируются не только габариты (длина, ширина, высота), но и форма (соотношение сторон), объём и ориентация в пространстве. Это позволяет классифицировать отдельный баундбокс связной компоненты как относящийся к определённому «коробочному» примитиву, например «брус» (вытянутый), «доска» (плоский) или «куб» (изометричный).

Алгоритм анализирует пространственные отношения между множеством баундбоксов связных компонент, выявляя характерные паттерны — группы связных компонент, баундбоксы которых группируются по определённым информативным признакам. Ключевыми признаками для группировки баундбоксов являются:

- отношения порядка (один баундбокс находится над другим, под другим);
- отношения смежности (баундбоксы примыкают друг к другу, соприкасаются гранями);
- отношения вложенности или наложения (один баундбокс частично перекрывает другой — внахлёст);
- форма и соразмерность (сочетание баундбоксов-брусов и баундбоксов-досок).

Математически группу связных компонент (их облаков точек и баундбоксов) можно представить в виде:

$$G_C = \left\{C_j\right\},\ G_B = \left\{B_j\right\},\quad j = 1..m,$$

где G_C — группа облаков точек связных компонент; G_B — соответствующая группа баундбоксов; C_j — облако точек j-й связной компоненты, $C_j = \left\{\left(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}\right)\right\}_{i=1}^{n_j}$; B_j — его баундбокс, $B_j = \left[\left(x_{\min j}, x_{\max j}\right), \left(y_{\min j}, y_{\max j}\right), \left(z_{\min j}, z_{\max j}\right)\right]$; n_j — размер облака точек C_j; m — число баундбоксов в составе группы G_B (и число облаков точек в составе группы G_C).

Слияние группы облаков точек G_C — расчёт «слитого» облака точек [21]

$$C = M\left(G_C\right) = \bigcup_{j=1}^{m} C_j\,. \tag{1}$$

Слияние группы баундбоксов G_B — расчёт «слитого» баундбокса

$$\begin{cases} B = M\left(G_B\right) = \left[\left(x_{\min}, x_{\max}\right), \left(y_{\min}, y_{\max}\right), \left(z_{\min}, z_{\max}\right)\right], \\ x_{\min} = \min\limits_j x_{\min j},\ x_{\max} = \max\limits_j x_{\max j}, \\ y_{\min} = \min\limits_j y_{\min j},\ y_{\max} = \max\limits_j y_{\max j}, \\ z_{\min} = \min\limits_j z_{\min j},\ z_{\max} = \max\limits_j z_{\max j}. \end{cases} \tag{2}$$

После того как группа баундбоксов связных компонент идентифицирована как принадлежащая одному сложному объекту, производится слияние группы облаков точек связных компонент по формуле (1), соответствующих группе баундбоксов. Слияние облаков точек связных компонент по уравнению (1) определяет облако выявляемого объекта, а слитый баундбокс по выражениям (2) — локацию его расположения.

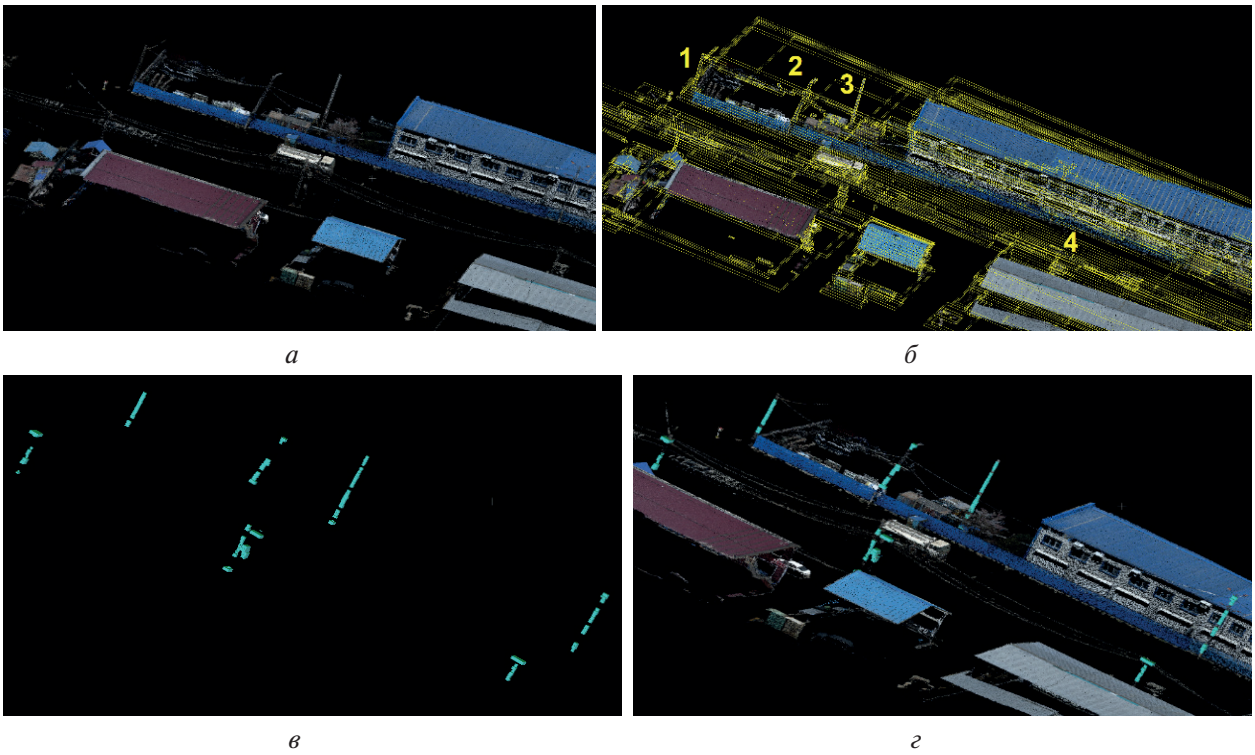
Пример.

Приведём пример работы метода для объектов класса «дорожные опоры».

Данный класс включает в себя опоры различного функционального назначения, расположенные вдоль дороги: уличные фонари, опоры, удерживающие контактную сеть, опоры с системами оповещения и др.

Отдельные элементы дорожных опор при сканировании могут быть разобщены в пространстве (в частности, из-за затенений). Однако их группы баундбоксов сохраняют характерную структуру: конструкции имеют форму башенок. Их основные информативные признаки: группа баундбоксов (в форме брусков), располагающихся вертикально друг над другом, возможно с наличиями зазоров по высоте, часто с небольшим смещением (внахлёст). На всём множестве баундбоксов, полученных декомпозицией, выявляются группы баундбоксов G_B с данными информативными признаками и соответствующие группы облаков точек G_C. Производится слияние выявленных групп облаков точек, соответствующих группе баундбоксов (башенки). Полученные слитые облака C образуют сегментации облаков точек дорожных опор.

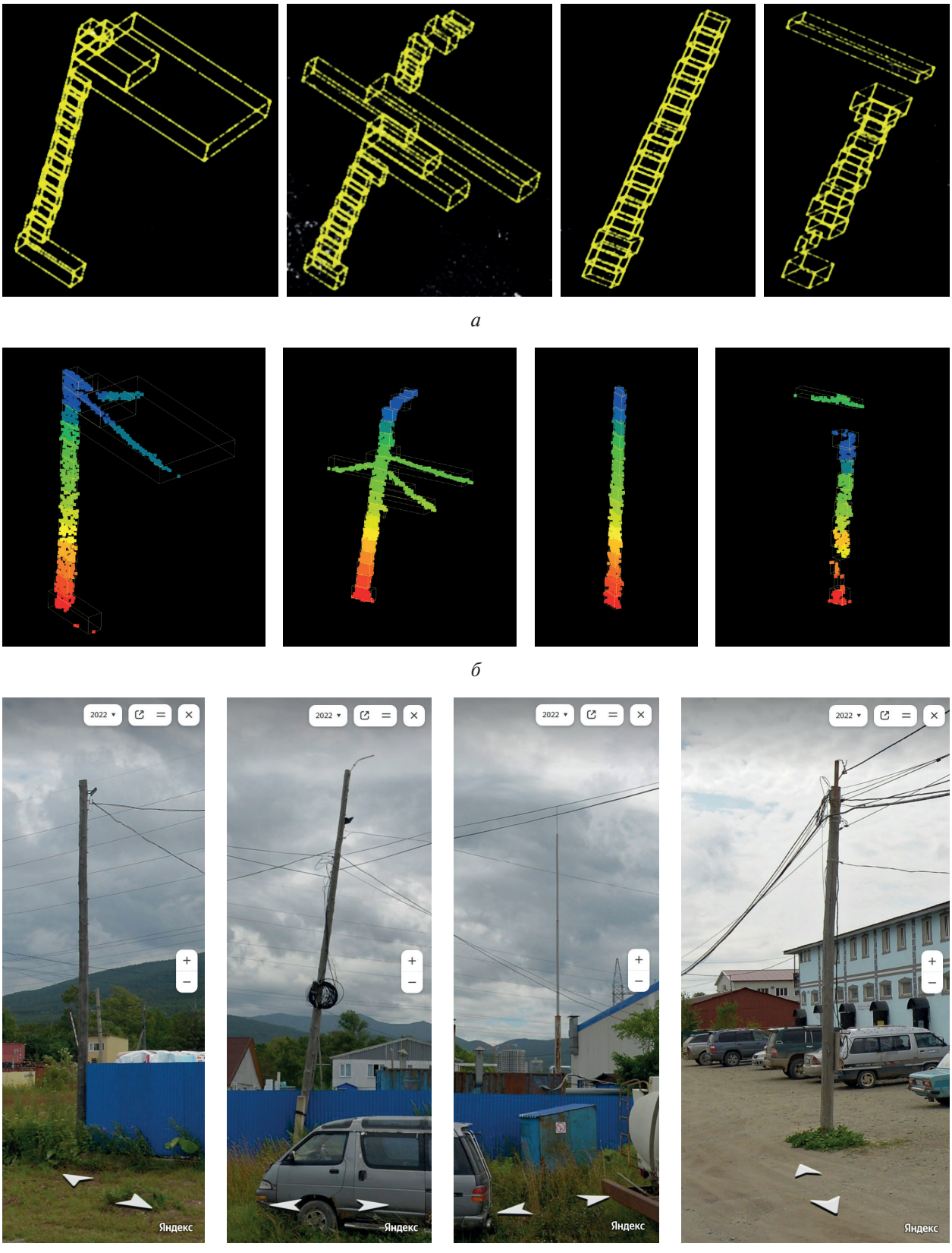
На *рис. 4* приведён пример сегментации дорожных опор на участке улицы. На *рис. 4а* показан один из облачных тайлов, полученных по циклу 1. На *рис. 4б* — вертикальная (по циклу 2) и объектная (по циклу 3) декомпозиция данного облака точек. На *рис. 4в* представлен результат сегментации дорожных опор для данного облачного тайла, а на *рис. 4г* — наложение сегментации на облако точек (на *рис. 4а*).



а *б* *в* *г*

Рис. 4. Примеры сегментации дорожных опор на участке улицы: *а* — облако точек; *б* — баундбоксы связных компонент; *в* — сегментация объектов; *г* — наложение сегментаций на облако точек

На *рис. 5* приведён пример более детального выделения объектов класса «дорожные опоры». На *рис. 5а* показаны примеры групп баундбоксов связных компонент в составе сегментированных облаков точек объектов (дорожных опор) (1)–(4), отмеченных на *рис. 4б*. На *рис. 5б* отображены слитые облака точек для этих объектов. На *рис. 5в* для визуального сравнения приведены наземные изображения выделенных объектов, полученные с сервиса Яндекс Карты в режиме просмотра улиц. Как видно из *рис. 5б*, (1), (2) и (4) — силовые прямостоечные опоры (для крепления контактных сетей), а (3) — несиловая прямостоечная опора (для другого назначения). Как видно, для дорожных опор (1), (2) и (4) в составе их групп баундбоксов есть баундбоксы, значительно большие по габаритам, чем другие. Наличие таких баундбоксов обусловлено тем, что облака точек данных дорожных опор смешиваются с прилегающими к ним участками облаков точек контактных сетей. Такие баундбоксы отсутствуют только для дорожной опоры (3), поскольку к ней не крепится контактная сеть (соответственно облака точек этой опоры не смешиваются с прилегающими к ним участками облаков точек контактной сети).



а

б

в

Рис. 5. Примеры сегментированных объектов (дорожных опор): *а* — слияние групп баундбоксов связных компонент; *б* — слияние групп облаков точек связных компонент; *в* — наземные изображения обнаруженных объектов

Расчёт геометрических моделей объектов

Геометрическая модель объекта включает три компонента:
- векторное представление модели;
- геометрические параметры модели;
- оценка точности расчёта геометрической модели.

Способ построения итоговой геометрической модели зависит от того, к какому классу отнесён объект (Мсаллам, Сырямкин, 2023; Tang et al., 2022).

Исходя из априорных знаний о классе, сегментированное облако объекта разделяется на соответствующие функциональные части. Это более тонкая декомпозиция, чем предыдущая, так как она опирается не на случайные разрывы в данных, а на ожидаемую структуру объекта.

Каждая выделенная часть облака аппроксимируется подходящим геометрическим примитивом, в частности: для вытянутых цилиндрических поверхностей строится осевая линия, для плоских элементов — плоскость, для точечных объектов вычисляется центроид.

Полученные примитивы не существуют изолированно. Анализируются их пространственные соотношения. На основе этого анализа формируется единая связанная геометрическая модель, где каждой линии и точке приписан определённый смысл.

Оценка точности расчёта геометрических моделей облаков точек объектов земной поверхности проводится по гистограммам отклонений точек облаков от аппроксимирующих точек, линий и поверхностей. На гистограммах можно выделить различные визуальные признаки оценки качества самих данных, которым соответствуют определённые параметры, в частности:

1. Близость центра распределения к нулю: чем ближе центр распределения к нулю, тем меньше систематических ошибок. Оценивается по формуле

$$\mu_{\text{близ}} = M/\sigma\,, \tag{3}$$

где M — матожидание; σ — среднеквадратическое отклонение.

2. Ширина пика вокруг центра распределения: чем шире пик распределения, тем больше точек относится к объекту и меньше — к шуму. Оценивается по формуле

$$\mu_{\text{шир}} = Q\left(0{,}75\right) - Q\left(0{,}5\right), \tag{4}$$

где $Q(\alpha)$ — α-квантиль.

3. «Тяжесть» хвостов распределения: чем весомее (тяжелее) хвосты распределения, тем больше зашумлено облако точек объекта. Оценивается по формуле

$$\mu_{\text{тяж}} = \frac{Q\left(0{,}95\right) - Q\left(0{,}5\right)}{Q\left(0{,}5\right) - Q\left(0{,}05\right)}. \tag{5}$$

4. Выбросы ветви распределения («зубчатость» распределения): неравномерность плотности точек с расстоянием от объекта, малая плотность точек облака объекта. Оценивается по формуле

$$\mu_{\text{выб}} = \frac{Q'\left(0{,}75\right) - Q'\left(0{,}25\right)}{Q'\left(0{,}5\right)}, \tag{6}$$

где $Q'\left(\alpha\right)$ — α-квантиль хвоста.

5. Асимметричность распределения: чем больше асимметричность распределения, тем больше «скрытых» облаков других объектов, их частей в облаке точек объекта. Оценивается по формуле

$$\mu_{\text{асим}} = \frac{Q\left(0{,}75\right) + Q\left(0{,}25\right) - 2Q\left(0{,}5\right)}{Q\left(0{,}75\right) - Q\left(0{,}25\right)}. \tag{7}$$

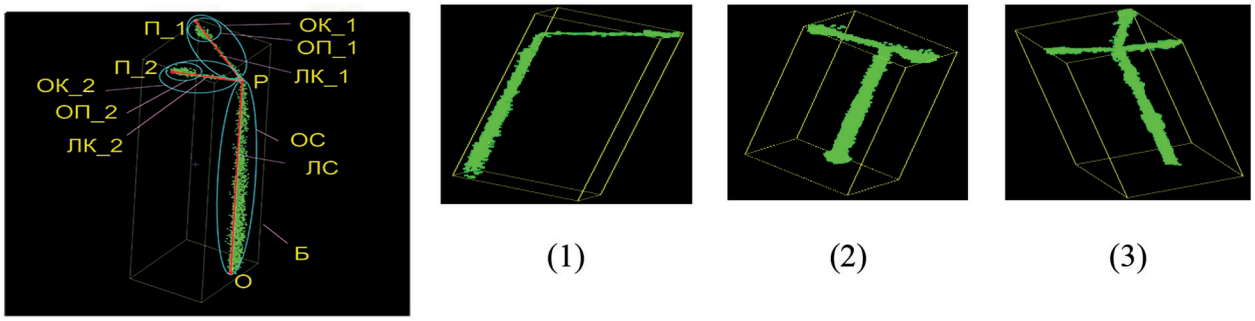
Пример.

Приведём примеры геометрических моделей объектов (дорожных опор), сегментированных из общего облака точек.

1. Векторное представление модели.

Разновидностью дорожных опор можно считать уличные фонари. По типовой структуре уличный фонарь включает вертикальную стойку, горизонтальный кронштейн и плафон.

Алгоритм, зная типовую структуру дорожной опоры (уличного фонаря), разделяет облачный объект на облачные компоненты (*рис. 6а*): *ОС* — облако вертикальной стойки фонаря; *ОК*k — облако k-го кронштейна фонаря; *ОП*k — облако плафона k-го кронштейна фонаря, $k = 1...q$, где q — количество кронштейнов, Б — баундбокс облачного объекта. По наблюдениям в подавляющем большинстве случаев количество кронштейнов в основном лежит в пределах $q = 1...3$ (см. *рис. 6б*).



а *б*

Рис. 6. Структура облака точек уличного фонаря: *а* — компоненты облака точек; *б* — облака точек для уличных фонарей с разным числом кронштейнов

Каждое из выделенных облаков обрабатывается для извлечения векторных компонентов (геометрических примитивов): Л*С* — линия облака *ОС*; $ЛК_k$ — линии облаков *ОК*k; *О* — точка основания вертикальной стойки фонаря; *Р* — точка разветвления кронштейнов; Пk — центроиды облаков *ОП*k.

В результате этих преобразований формируется векторное представление моделей объектов — геометрически связанные векторные компоненты (Л*С*, $ЛК_k$, *О*, *Р*, Пk).

2. Геометрические параметры модели.

Ниже приведены основные геометрические параметры уличного фонаря на *рис. 6а*, рассчитанные по его облаку точек.

Пример оценки геометрических параметров уличного фонаря

Угол наклона к плоскости *XY*	89,7°
Угол наклона к плоскости *XZ*	89,8°
Угол наклона к плоскости *YZ*	89,7°
Общая высота	10,16 м
Высота вертикальной стойки	8,7 м
Размер баундбокса по *X*	2,97 м
Размер баундбокса по *Y*	2,48 м
Размер баундбокса по *Z*	10,13 м
Число кронштейнов	2
Длина кронштейна (1)	2,62 м
Длина кронштейна (2)	2,58 м

3. Оценка точности расчёта геометрической модели.

Оценим точность расчёта линий вертикальных стоек дорожных опор по отклонениям точек облака от этой линии на примере дорожных опор (1)–(4), показанных на *рис. 5*.

На *рис. 7* приведены гистограммы отклонений точек (*N* — количество точек, *s* — отклонений точек облака точек дорожной опоры от линии её вертикальной стойки, в метрах), а в *таблице* — результаты оценки параметров 1–5 (по формулам (3)–(7)) для дорожных опор (1)–(4).

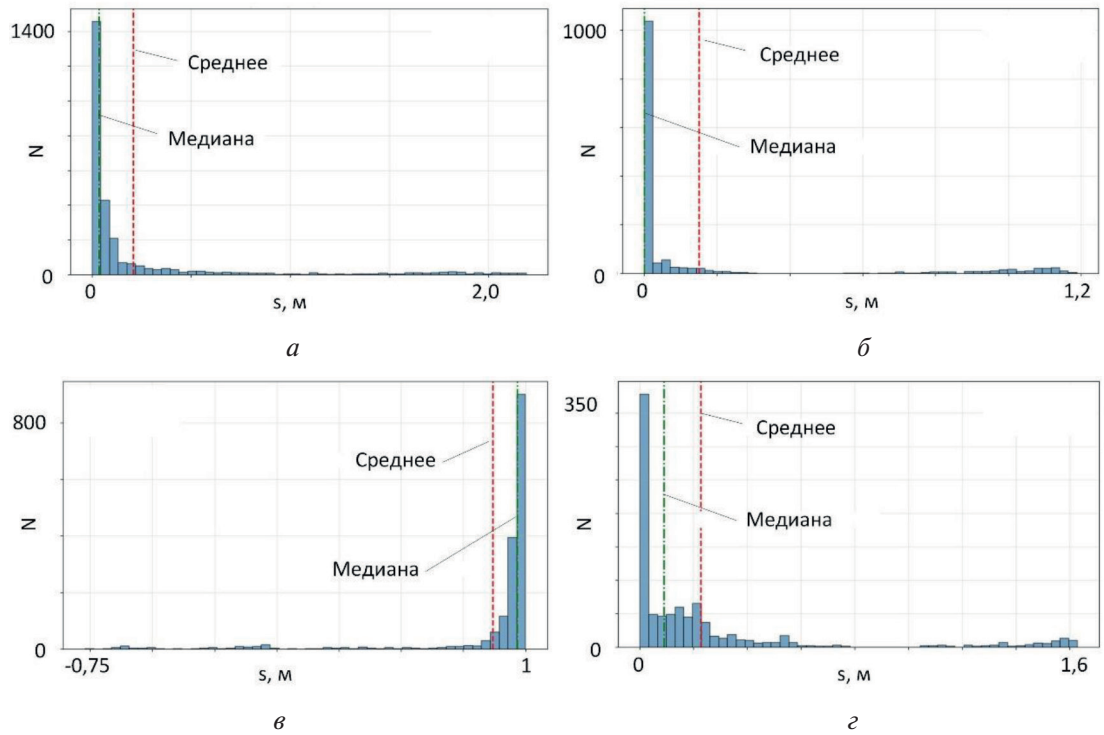


Рис. 7. Гистограммы отклонений точек облака точек дорожной опоры от линии её вертикальной стойки для дорожных опор, представленных на *рис. 5*: *а* — объект (1); *б* — объект (1), (2); *в* — объект (1), (3); *г* — объект (1), (4)

Оценка качества облаков точек объектов по гистограмме
(оценка точности расчёта линий вертикальных стоек дорожных опор)

№	Название параметра	Значение параметра для выделенных объектов			
		(1)	(2)	(3)	(4)
Среднее		0,91	0,15	0,87	0,23
Медиана		0,035	0	0,97	0,09
1	Близость центра распределения к нулю	0,46	0,44	2,83	0,58
2	Ширина пика вокруг центра распределения	0,12	0,05	0,05	0,23
3	Тяжесть хвостов распределения	44,52	0,03	0,03	15,00
4	Выбросы ветви распределения	0,43	1,00	–0,38	0,22
5	Асимметричность распределения	0,15	0,03	0,003	0,05

Проведём краткий анализ полученных результатов для выделенных дорожных опор.

Параметр 1.

Для объектов (1), (2) и (4) смещение находится в диапазоне 0,44–0,58, что указывает на незначительную систематическую ошибку определения центра (линии вертикальной стойки). Если ширина пика мала (0,05–0,12), то даже умеренное смещение (0,44–0,58) считается статистически значимым и указывает именно на систематическую ошибку, а не на случайный разброс точек. Для объекта (2) с шириной пика 0,05 смещение 0,44 — это чёткий признак небольшой систематической ошибки. Для объекта (4) с шириной пика 0,23 смещение 0,58 частично может быть обусловлено разбросом.

Для объекта (3) значение 2,83 аномально высокое — это означает, что центр распределения сильно смещён относительно нуля. Данное значение не может быть объяснено случайным разбросом или шумом (ширина пика мала). Эта аномалия свидетельствует: об ошибке

привязки облака точек к системе координат; неправильном определении нуля (базовой линии) для этой дорожной опоры; включении в облако точек от другого объекта, смещённого относительно вертикальной стойки.

Параметр 2.

Ширина пика характеризует разброс точек вокруг центра. Объекты (2) и (3) показывают очень узкие пики (0,05), что говорит о высокой точности сканирования — точки плотно сконцентрированы вокруг центральной линии. Объект (4) имеет самый широкий пик (0,23), что указывает на больший разброс точек — возможно, более сложная геометрия дорожной опоры или больше шума. Объект (1) занимает промежуточное положение (0,12).

Параметр 3.

Этот параметр показывает отношение правого хвоста к левому. Дорожные опоры (1) и (4) имеют огромные значения параметра (>1), что означает сильное преобладание правого хвоста — точки справа от центра находятся гораздо дальше, чем слева. Это свидетельствует о наличии другого пика на гистограммах (отдалённые точки). Дорожные опоры (2) и (3) имеют значение параметра 0,03 (<1), что означает преобладание левого хвоста, но столь малое значение подозрительно и может указывать на то, что данные несимметричны.

Параметр 4.

Этот параметр показывает, насколько разбросаны точки в хвосте относительно их медианы. Объект (3) имеет отрицательное значение параметра (–0,38). Отрицательное значение указывает на преобладание левого хвоста над правым (для объекта (3) левый хвост длиннее правого на 38 % от медианы хвоста). Это означает, что в хвосте распределения опоры (3) точки слева от медианы хвоста разбросаны сильнее или расположены дальше, чем точки справа. Объект (2) со значением 1 показывает, что параметр 2 хвоста равен медиане — это параметр значительного разброса точек в хвосте. Для объекта (4) значение 0,22 параметра 4 свидетельствует о сгруппированности точек.

Параметр 5.

По данному параметру все значения близки к нулю, что говорит о квантильной симметрии распределений. Это на первый взгляд противоречит параметру тяжести хвостов, но объясняется тем, что по формуле (5) оценивается симметрия основной массы данных (между $Q(0{,}25)$ и $Q(0{,}75)$), а тяжесть хвостов оценивает дальние хвосты (за значением $Q(0{,}95)$ и до значения $Q(0{,}05)$). Таким образом, основное облако точек может быть симметричным, но при этом иметь асимметричные хвосты.

Таким образом, наилучшее качество имеет облако точек объекта (2). Хуже качество — у объекта (4) (наличие широкого пика и тяжёлого хвоста). Для объектов (1) и (3) требуется фильтрации, ввиду наличия очень тяжёлого хвоста (у объекта (1)) и аномальных значений параметров (у объекта (3)).

Заключение

В результате проведённого исследования разработана и экспериментально апробирована комплексная методика векторной обработки данных лазерного сканирования для объектов дорожной инфраструктуры и придорожного пространства.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Предложена иерархическая схема обработки, сочетающая методы фильтрации, кластеризации, растрирования и тайлирования, что позволяет эффективно работать с облаками точек большой протяжённости при ограниченных вычислительных ресурсах.

2. Разработаны алгоритмы автоматизированной векторизации дорожного полотна, включающие выделение границ, построение осевой линии, а также методы продольного и поперечного зонирования для функционального структурирования пространства.

3. Создан метод обнаружения сложных антропогенных объектов (на примере дорожных опор), основанный на анализе пространственных отношений между баундбоксами связных компонент и выявлении характерных паттернов.

4. Предложен подход к построению параметрических геометрических моделей объектов, включающий классозависимую декомпозицию, аппроксимацию частей примитивами и оценку точности результатов на основе гистограммного анализа отклонений.

Практическая значимость работы подтверждается возможностью интеграции предложенных алгоритмов в существующие программные комплексы (CloudCompare) и их применения для решения задач инвентаризации, мониторинга и создания цифровых двойников элементов дорожной инфраструктуры. Дальнейшие исследования могут быть направлены на расширение спектра распознаваемых классов объектов и повышение степени автоматизации процесса за счёт применения методов глубокого обучения на этапе классификации групп баундбоксов.

Литература

1. *Евтюков С. А.*, *Перевалов Н. В.* Лазерное сканирование при строительстве и ремонте автомобильных дорог // Вестн. гражданских инженеров. 2018. № 4(69). С. 132–137. DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-4-132-137.
2. *Миронюк В. П.*, *Кузнецов А. О.*, *Шахназарян В. В.* О формировании требований по выполнению лазерного сканирования автомобильных дорог // Дороги и мосты. 2023. Вып. 49-1/2023. С. 54–82.
3. *Мотуз В. О.*, *Сарычев Д. С.* Применение лазерного сканирования и 3D-моделей в жизненном цикле автомобильных дорог // САПР и ГИС автомобильных дорог. 2014. № 1(2). С. 12–15. DOI: 10.17273/CADGIS.2014.1.3.
4. *Мсаллам М.*, *Сырямкин В. И.* Методика регистрации 3Д облаков точек с использованием коррекции плоскостей и корреляции гистограмм // Прикаспийский журн.: управление и высокие технологии. 2023. № 1(61). С. 73–89.
5. *Овермарс М.*, *Берг М.*, *Чеонг О.*, *Кревельд М.* Вычислительная геометрия. Алгоритмы и приложения: учеб. М.: ДМК Пресс, 2017. 438 с.
6. *Сойфер В. А.* Методы компьютерной обработки изображений. М.: Физматлит, 2003. 784 с.
7. *Уймин А. Г.*, *Греков В. С.* Применение алгоритма Дугласа–Пеккера в вопросах онлайн-аутентификации инструментов удалённой работы при подготовке специалистов укрупнённой группы специальностей 10.00.00 «Информационная безопасность» // Электронные библиотеки. 2024. Т. 27. № 4. С. 679–694. DOI: 10.26907/1562-5419-2024-27-4-679-694.
8. *Щербаков В. В.*, *Бунцев И. А.*, *Щербаков И. В. и др.* Система мобильного лазерного сканирования для железных и автомобильных дорог // Вестн. Сибирского гос. ун-та путей сообщения. 2024. № 5(72). С. 106–115. DOI: 10.52170/1815-9265_2024_72_106.
9. *He G. B.*, *Li L. L.* Research and application of LiDAR technology in cadastral surveying and mapping // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2020. V. XLIII-B1-2020. P. 33–37. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-33-2020.
10. *Julge K.*, *Ellmann A.*, *Köök R.* Unmanned aerial vehicle surveying for monitoring road construction earthworks // The Baltic J. Road and Bridge Engineering. 2019. V. 14. No. 1. P. 1–17. DOI: 10.7250/bjrbe.2019-14.430.
11. *Kaňuk J.*, *Supinsky J.*, *Šašak J. et al.* Semi-automatic LiDAR point cloud denoising using a connected-component labelling method // Geographia Cassoviensis. 2019. V. XIII. Iss. 2. pp. 210–227. DOI: 10.33542/GC2019-2-08.
12. *Knyaz V. A.*, *Kniaz V. V.*, *Zheltov S. Yu. et al.* Hierarchical scene graph generation and vectorization of aerial images // The Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2025. V. XLVIII-2/W9-2025. P. 161–167. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W9-2025-161-2025.
13. *Murynin A. B.*, *Rihter A. A.*, *Vorobyev V. E.* Algorithms for morphological analysis of vectorized boundaries in images // Pattern Recognition and Image Analysis. 2025. V. 35. No. 3. P. 438–454. DOI: 10.1134/S1054661825700300.
14. *Pradhan B.*, *Sameen M. I.* Laser scanning systems in highway and safety assessment. Analysis of highway geometry and safety using LiDAR. Cham: Springer, 2020. 172 p. DOI: 10.1007/978-3-030-10374-3.
15. *Tang S.*, *Li X.*, *Zheng X. et al.* BIM generation from 3D point clouds by combining 3D deep learning and improved morphological approach // Automation in Construction. 2022. V. 141. Article 104422. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104422.
16. *Vorobyev V. E.*, *Murynin A. B.*, *Richter A. A.* Choice of clustering methods in machine learning for studying ecological objects based on satellite data // J. Computer and Systems Sciences Intern. 2024. V. 63. No. 5. P. 821–832. DOI: 10.1134/S1064230724700588.

17. *Vu N. Q.*, *Thanh H. P. T.* Mobile Lidar for road surface monitoring: a case Study of an integrated AU20 Lidar // Recent Advances in Structural Health Monitoring and Engineering Structures. Lecture Notes in Civil Engineering. V. 460. Singapore: Springer, 2024. P. 575–584. DOI: 10.1007/978-981-97-0399-9_53.

Algorithms for vector processing of laser scanning data of objects on the Earth's surface for integration with satellite data

A. B. Murynin[1], A. A. Richter[2]

[1] *Federal Research Center "Computer Science and Control" RAS*
Moscow 119333, Russia
E-mail: amurynin@bk.ru
[2] *JSC Tazmar IT-Solutions, Saint Petersburg 195160, Russia*

This paper presents a method for vectorising laser scanning data (point clouds) of man-made objects, aimed at the automated construction of interpretable geometric models of road infrastructure. The approach is based on integrating terrestrial laser scanning data with satellite and cartographic data. A multi-stage processing scheme is proposed, including preprocessing and filtering of point clouds, their decomposition into connected components using clustering methods, vectorization of extracted elements based on computational geometry operations and morphological analysis, and subsequent calculation of geometric parameters of the objects. Particular attention is paid to processing of linearly extended objects (highways): algorithms for identifying centerlines, roadbed boundaries, and shoulders, as well as methods for longitudinal and transverse zoning for structuring space, have been developed. The effectiveness of the proposed solutions is demonstrated using an example of segmentation and construction of geometric models of road supports, with accuracy assessed using deviation histograms. The algorithmic and software implementation is based on the use of open-source tools, which ensures the reproducibility of the results.

Keywords: point cloud, laser scanning, lidar, vectorization, remote sensing, morphological analysis, computational geometry, road infrastructure, geometric model

Accepted: 02.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-35-49

References

1. Evtyukov S. A., Perevalov N. V., Laser scanning in road construction and repair, *Bull. of Civil Engineers*, 2018, No. 4(69), pp. 132–137 (in Russian), DOI: 10.23968/1999-5571-2018-15-4-132-137.
2. Mironyuk V. P., Kuznetsov A. O., Shakhnazaryan V. V., On the formation of requirements for performing laser scanning of roads, *Dorogi i mosty*, 2023, Iss. 49-1/2023, pp. 54–82 (in Russian).
3. Motuz V. O., Sarychev D. S., Application of laser scanning and 3D models in the life cycle of roads, *CAD and GIS for roads*, 2014, No. 1(2), pp. 12–15 (in Russian), DOI: 10.17273/CADGIS.2014.1.3.
4. Msallam M., Syryamkin V. I., Method for registration of 3D point clouds using plane correction and histogram correlation, *Caspian J.: Management and High Technologies*, 2023, No. 1(61), pp. 73–89 (in Russian).
5. Overmars M., Berg M., Cheong O., Kreveld M., *Vychislitel'naya geometriya. Algoritmy i prilozheniya: uchebnik* (Computational geometry. Algorithms and applications: Textbook), Moscow: DMK Press, 2017, 438 p. (in Russian).
6. Soifer V. A., *Metody komp'yuternoi obrabotki izobrazhenii* (Computer image processing methods), Moscow: Fizmatlit, 2003, 784 p. (in Russian).
7. Uimin A. G., Grekov V. S., Application of the Douglas–Pecker algorithm in online authentication of remote work tools in the training of specialists in the enlarged group of specialties 10.00.00 "Information security", *Russian Digital Libraries J.*, 2024, V. 27, No. 4, pp. 679–694 (in Russian), DOI: 10.26907/1562-5419-2024-27-4-679-694.

8. Shcherbakov V. V., Buntsev I. A., Shcherbakov I. V. et al., Mobile laser scanning system for railways and highways, *Bull. Siberian State University of Transport*, 2024, No. 5(72), pp. 106–115 (in Russian), DOI: 10.52170/1815-9265_2024_72_106.
9. He G. B., Li L. L., Research and application of LiDAR technology in cadastral surveying and mapping, *The Intern. Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2020, V. XLIII-B1-2020, pp. 33–37, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2020-33-2020.
10. Julge K., Ellmann A., Köök R., Unmanned aerial vehicle surveying for monitoring road construction earthworks, *The Baltic J. Road and Bridge Engineering*, 2019, V. 14, No. 1, pp. 1–17, DOI: 10.7250/bjrbe.2019-14.430.
11. Kaňuk J., Supinsky J., Šašak J. et al., Semi-automatic LiDAR point cloud denoising using a connected-component labelling method, *Geographia Cassoviensis*, 2019, V. XIII, Iss. 2, pp. 210–227, DOI: 10.33542/GC2019-2-08.
12. Knyaz V. A., Kniaz V. V., Zheltov S. Yu. et al., Hierarchical scene graph generation and vectorization of aerial images, *The Intern. Archives of the Photogrammetry*, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2025, V. XLVIII-2/W9-2025, pp. 161–167, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-W9-2025-161-2025.
13. Murynin A. B., Rihter A. A., Vorobyev V. E., Algorithms for morphological analysis of vectorized boundaries in images, *Pattern Recognition and Image Analysis*, 2025, V. 35, No. 3, pp. 438–454, DOI: 10.1134/S1054661825700300.
14. Pradhan B., Sameen M. I., *Laser scanning systems in highway and safety assessment. Analysis of highway geometry and safety using LiDAR*. Cham: Springer, 2020, 172 p., DOI: 10.1007/978-3-030-10374-3.
15. Tang S., Li X., Zheng X. et al., BIM generation from 3D point clouds by combining 3D deep l learning and improved morphological approach, Automation in Construction, 2022, V. 141, Article 104422, DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104422.
16. Vorobyev V. E., Murynin A. B., Richter A. A., Choice of clustering methods in machine learning for studying ecological objects based on satellite data, *J. Computer and Systems Sciences Intern.*, 2024, V. 63, No. 5, pp. 821–832, DOI: 10.1134/S1064230724700588.
17. Vu N. Q., Thanh H. P. T., Mobile LiDAR for road surface monitoring: a case study of an integrated AU20 LiDAR, In: *Recent Advances in Structural Health Monitoring and Engineering Structures. Lecture Notes in Civil Engineering*, V. 460, Singapore: Springer, 2024, pp. 575–584, DOI: 10.1007/978-981-97-0399-9_53.