



УДК: 625.7

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.14

EDN: LWKFDO

## Математическая модель распознавания колейности дорожного покрытия по данным мобильного лазерного сканирования

К.А. Васильев<sup>1</sup>, Ю.Г. Лазарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,  
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

**Аннотация:** Колейность — один из наиболее распространённых дефектов асфальтобетонных покрытий, требующий оперативной диагностики для проектирования ремонта. Существующие методы измерения (трёхметровая рейка, профилографы) либо низкопроизводительны, либо требуют эталонной поверхности, часто отсутствующей на объектах ремонта. Поэтому необходима методика, не требующая проектных данных, обеспечивающая сплошной профиль и расчёт объёма дефекта.

**Цель работы** — разработать математическую модель, которая по данным мобильного лазерного сканирования вычисляет глубину и объём колеи без привлечения проектной документации. Для достижения цели необходимо: разработать метод реконструкции эталонной поверхности непосредственно по облаку точек; предложить алгоритм вычисления глубины колеи как разности реального и эталонного профилей; реализовать расчёт объёма колеи численным интегрированием; выполнить экспериментальную верификацию и сравнение с существующими подходами.

**Материалы и метод.** Эталонная поверхность восстанавливается по двум зонам наката в скользящем окне 5 м, глубина — как отклонение реального профиля от эталонного, объём — численным интегрированием. Методика включает обработку облака точек, построение профилей с шагом 1 м, реконструкцию эталонной поверхности, расчёт глубины и объёма, верификацию по измерениям рейкой.

**Результаты.** Сравнение с тремя подходами (проектный поперечный уклон; сглаживание профиля полиномом по всей ширине; поиск локальных минимумов) показало: предлагаемая модель даёт минимальную ошибку (менее 2 мм), тогда как метод проектного уклона на виражах ошибался на 12–15 мм, сглаживание занижало глубину на 20–30 % при протяжённой колейности, а метод локальных минимумов давал разброс до 8 мм.

**Выводы.** Результаты свидетельствуют о применимости модели для дорог II–III категорий с регулярным поперечным профилем и выраженными зонами наката. Эксперимент на двух участках общей протяжённостью 10 км достаточен для первичной верификации, но для подтверждения универсальности необходимы испытания на более широкой выборке.

**Ключевые слова:** мобильное лазерное сканирование, колейность, математическая модель, эталонная поверхность, облако точек, поперечный профиль, ремонт автомобильных дорог.

**Для цитирования:** Васильев К.А., Лазарев Ю.Г. Математическая модель распознавания колейности дорожного покрытия по данным мобильного лазерного сканирования // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 212–222, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.14, EDN: LWKFDO

# A mathematical model for recognizing road surface rutting using mobile laser scanning data

K.A. Vasiliev<sup>1</sup>, Yu.G. Lazarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,  
St. Petersburg, Russian Federation

**Abstract:** Rutting is one of the most common defects in asphalt concrete pavements, requiring prompt diagnosis for repair planning. Existing measurement methods (such as the three-meter straightedge or profilographs) are either low-productive or require a reference surface—which is often unavailable at repair sites. Therefore, a methodology is needed that does not rely on design data but provides a continuous profile and allows for the calculation of the defect's volume.

*The aim* of this study is to develop a mathematical model that calculates rut depth and volume using mobile laser scanning data, without recourse to design documentation. To achieve this aim, the following steps are required: developing a method to reconstruct the reference surface directly from the point cloud; proposing an algorithm to calculate rut depth as the difference between the actual and reference profiles; implementing rut volume calculation via numerical integration; and performing experimental verification and comparison with existing approaches.

*Materials and Method.* The reference surface is reconstructed based on two wheel-track zones within a 5-meter sliding window; depth is determined as the deviation of the actual profile from the reference profile, and volume is calculated via numerical integration. The methodology encompasses point cloud processing, profile generation at 1-meter intervals, reference surface reconstruction, depth and volume calculation, and verification by straightedge measurements.

*Results.* A comparison with three other approaches (design cross-slope; polynomial profile smoothing across the full width; and the local minima method) demonstrated that the proposed model yields the lowest error (less than 2 mm). In contrast, the design cross-slope method showed errors of 12–15 mm in superelevated sections; the smoothing method underestimated depth by 20–30% in areas of extensive rutting; and the local minima method produced a scatter of up to 8 mm.

*Conclusions.* The results indicate the model's applicability to roads of Category II and III featuring regular cross-profiles and distinct wheel tracks. While the experiment conducted on two road sections totaling 10 km in length is sufficient for initial verification, testing on a broader sample is required to confirm the model's universality.

**Keywords:** mobile laser scanning, rutting, mathematical model, reference surface, point cloud, cross-section profile, road repair.

**For citation:** Vasiliev K.A., Lazarev Yu.G. A mathematical model for recognizing road surface rutting using mobile laser scanning data // News KSUAE, 2026, № 2 (76), p. 212-222, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.14, EDN: LWKFDO

## 1. Введение

В Российской Федерации до 2030 года продолжается реализация национального проекта «Инфраструктура для жизни». По данным на конец 2025 года, нормативным требованиям соответствовало уже 55,2 % дорог регионального и местного значения, тогда как плановый индикатор на 2030 год установлен на уровне не менее 60 %. Разница между текущим и целевым состояниями существенна, при этом на участках с высокой интенсивностью движения или в зонах с агрессивными климатическими условиями деградация покрытия происходит интенсивнее. Согласно оценкам Росавтодора, ежегодные объёмы ремонта составляют 8–10 тыс. км, однако накопленный недоремонт оценивается в десятки тысяч километров. Из этого следует, что система диагностики должна обеспечивать не только периодичность, но и высокую достоверность результатов, поскольку погрешности на стадии обследования ведут к ошибочным проектным решениям [1-2]. В ряду современных методов инструментального контроля выделяется мобильное лазерное сканирование (МЛС), которое формирует плотные трёхмерные облака точек с

пространственной привязкой – плотность достигает нескольких тысяч точек на квадратный метр [3-6]. В отличие от точечных геодезических методов (теодолитная или тахеометрическая съёмка), МЛС обеспечивает сплошное покрытие всей ширины дорожного полотна, регистрируя как само покрытие, так и придорожные элементы (бордюры, знаки, ограждения), при скорости движения носителя 40–50 км/ч. Однако полученное облако точек представляет собой первичный, необработанный материал; для вычисления инженерных параметров (глубина и объём колеи) необходимы специализированные алгоритмы, учитывающие дорожную геометрию. Большинство универсальных методов фильтрации и сегментации не учитывают уклоны, выражи или колеи, а если и учитывают, то требуют ручной настройки под каждый участок [7-9].

В мировой практике для контроля колеи активно применяются лазерные профилометры (Road Surface Profilers) и системы на основе мобильного лазерного сканирования. Например, в США и странах ЕС действуют стандарты ASTM E950 / EN 13036-6, регламентирующие измерение продольной ровности, а для колеи используют индекс RUT (Maximum Rut Depth). Исследования Kukko et al. (2021), Faisal & Gargoum (2023) и Liu et al. (2025) показывают, что МЛС даёт точность, сопоставимую с лазерными профилографами, но при этом требует калибровки по эталонной поверхности. Последние работы (Zhang et al., 2024) предлагают нейросетевые методы автоматической сегментации колеи, однако они требуют больших размеченных наборов данных и не всегда устойчивы к вариациям уклона. Таким образом, задача создания метода, не требующего эталона и работающего непосредственно по облаку точек, остаётся актуальной.

Самый частый и опасный дефект — колеи, пластические просадки в полосах наката. Они ухудшают ровность, но главное — в них застаивается вода, сцепление снижается, и на мокрой дороге растёт риск аквапланирования [10-11]. Кроме того, края колеи становятся концентраторами напряжений, что ведёт к трещинам и выкрашиванию. Согласно ГОСТ Р 50597-2017 (п. 5.2.4, таблица 5.3), предельно допустимая глубина колеи на участке полосы движения длиной 100 м дифференцирована по категориям дорог: для дорог IА, IБ, IВ категорий — не более 20 мм, для II категории — не более 25 мм, для III–IV категорий — не более 30 мм. В отраслевых методических рекомендациях ОДМ 218.2.075-2016 для назначения ремонтных мероприятий часто используется более строгий порог 15 мм, что подчёркивает важность точных измерений. В Европе и США аналогичные пороги колеблются от 10 до 20 мм в зависимости от категории и скоростного режима, что подтверждает актуальность задачи достоверной оценки колеи.

Методы измерения колеи делятся на три группы. Традиционная рейка по ГОСТ 30412-96 даёт лишь отдельные измерения с необходимым шагом в соответствии с заданием, например 50-100 м. Производительность в данном методе самая низкая – около 1-2 км за смену. Результат зависит напрямую от производителей работ и равномерную колею на длинных участках такой метод не выявляет. Профилографы и лазерные установки формируют непрерывный профиль, но они требуют калибровки по эталонной поверхности автомобильной дороги и очень чувствительны к вибрациям и состоянию подвески автомобиля [12-13]. И конечно мобильное лазерное сканирование даёт детальную 3D-модель, но существующие методики и алгоритмы обработки данных жестко привязаны к проектному уклону. При плавных просадках это приводит к потере дефектов на фоне общего профиля [14-17]. Алгоритмы, которые основаны на поиске локальных минимумов в поперечных сечениях нестабильны на выразах, потому что поперечный профиль несимметричен (уклоны и длина разная относительно оси), из-за этого ошибка может быть не всегда с одним знаком, либо плюс, либо минус [18]. Главная проблема большинства подходов – наличие эталонного профиля автомобильной дороги (проектные данные устарели или вообще не соответствуют действительности) [19]. В существующих коммерческих решениях (например, ТИМ КРЕДО 3D СКАН, TerraSolid) расчёт объёма колеи, как правило, выполняется приближённо через осреднение глубины по ширине, что даёт погрешность 10–20 %. Предлагаемый метод выполняет прямое численное интегрирование, что повышает точность. Что касается нейросетевых методов (PointNet, RandLA-Net и др.), они эффективны для классификации, но для количественного расчёта глубины и объёма требуют дополнительных постобработок; в нашей модели эти этапы

объединены. Предлагаемая нами математическая модель распознавания колеи решает эти задачи автоматически и без наличия проектной документации – только по облаку МЛС, по которому далее будет построена поверхность автомобильной дороги.

Ключевое отличие – эталонная поверхность восстанавливается непосредственно по облаку точек, без использования проектных значений. Для этого в каждом поперечном сечении выделяются левая и правая зоны наката (шириной по 0,7 м), по которым в скользящем окне 5 м строится аппроксимирующий опорный профиль [20–22]. Благодаря такому построению алгоритм корректно компенсирует фактический уклон (в том числе на виражах) и остаётся устойчивым к локальным выбоинам и трещинам. Расчёт объёма выполняется численным интегрированием разности реального и эталонного профилей, что даёт результат непосредственно в кубических метрах, без привлечения эмпирических коэффициентов.

Цель настоящей работы – разработать математическую модель, которая по данным мобильного лазерного сканирования вычисляет глубину и объём колеи без привлечения проектной документации. Для достижения цели необходимо: разработать метод реконструкции эталонной поверхности непосредственно по облаку точек; предложить алгоритм вычисления глубины колеи как разности реального и эталонного профилей; реализовать расчёт объёма колеи численным интегрированием; выполнить экспериментальную верификацию и сравнение с существующими подходами.

## 2. Материалы и методы

Исходными данными для модели служат:

1. Облако точек МЛС  $P = \{p_i = (x_i, y_i, z_i), i = 1..N\}$ , полученное с плотностью не менее 400–500 точек/м<sup>2</sup> на проезжей части (в наших экспериментах фактическая плотность составляла 800–1200 точек/м<sup>2</sup>).

2. Векторная картограмма разметки  $M = \{m_{ось}, m_{лево}, m_{право}\}$ , используемая для привязки поперечных сечений.

### *Формирование поперечных сечений*

Для каждого погонного метра трассы строится поперечное сечение. Переход от глобальных координат к трассовой системе (s,u,z) выполняется с использованием параметрического представления оси дороги [23–25]. Для каждого сечения с шагом  $\Delta S = 1$  м формируется профиль  $\Gamma_i = \{u_j, z_{ij}\}$  — поперечная координата с шагом 0,05 м.

### *Реконструкция эталонной поверхности*

Главная особенность нашего подхода состоит в том, что эталонная поверхность восстанавливается прямо по облаку точек, минуя обращение к проекту. В отличие от построения сглаженной поверхности по всему профилю, наш подход использует только зоны наката, что позволяет сохранить информацию о фактическом поперечном уклоне и не «замыливать» колею при её протяжённости. Для каждого поперечного сечения идентифицируются две зоны наката (левая и правая) шириной 0,7 м каждая, расположенные на расстоянии 0,5–1,0 м от кромок проезжей части. Эти зоны являются наименее изношенными участками покрытия и сохраняют исходный уклон дороги [26–28].

Для каждой зоны наката в скользящем окне шириной 5 м (по 2 сечения слева и справа от текущего) выполняется аппроксимация полиномом второй степени методом

$$z_{\text{этал}}(s, u) = \alpha_0 + \alpha_1 s + \alpha_2 u + \alpha_3 s^2 + \alpha_4 u^2, \quad (1)$$

где s – продольная координата (расстояние вдоль оси дороги), u – поперечная координата;  $\alpha_0 \dots \alpha_4$  – коэффициенты аппроксимации.

Эталонный профиль в текущем сечении получается интерполяцией между левой и правой зонами.

### *Вычисление глубины и объёма колеи*

Глубина колеи в каждом сечении определяется как:

$$\Delta h(u) = z_{\text{реал}}(u) - z_{\text{этал}}(u), u \in U_{\text{зона}}, \quad (2)$$

где  $U_{\text{зона}}$  – множество поперечных координат, соответствующих зоне наката.

Максимальная глубина:  $h_{\text{max}} = \max(\Delta h(u))$ . Средняя глубина:  $h_{\text{ср}} = \frac{1}{b} \int \Delta h(u) du$ , где b — ширина колеи.

Объём колеи на участке вычисляется численным интегрированием:

$$V = \int_{S_{\text{нач}}}^{S_{\text{кон}}} \int_{u \in U_{\text{зона}}} \Delta h(s, u) du ds, \quad (3)$$

В дискретном виде (шаг 1 м по длине, 0,05 м по ширине):

$$V = \Delta S \cdot \Delta u \cdot \sum_{i=1}^N \sum_{j \in U_{\text{зона}}} \Delta h(s_i, u_j), \quad (4)$$

Предлагаемая модель автоматически адаптируется к изменениям поперечного профиля, поскольку эталонная поверхность строится отдельно для левой и правой зон наката в каждом метровом сечении. Это позволяет корректно отражать вираж, уширения и даже локальные примыкания, так как окно скользит вдоль трассы, а аппроксимация выполняется независимо для каждой стороны.

#### Экспериментальная верификация

Для проверки модели выполнены полевые испытания на двух участках автомобильных дорог (А-114 «Новая Ладога – Вологда», км 45–50, и Р-21 «Кола», подъезд к Петрозаводску, км 12–17) общей протяжённостью 10 км. Съёмка выполнялась системой Торсон IP-S3 со скоростью 45–55 км/ч, плотность облака составила 800–1200 точек/м<sup>2</sup>. Контрольные измерения глубины колеи проводились трёхметровой рейкой с клиновым промерником по ГОСТ 30412-96 в 202 поперечных сечениях (шаг 50 м). Сопоставление результатов выполнено с использованием коэффициента корреляции Пирсона и среднеквадратического отклонения (СКО).

### 3. Результаты и обсуждение

Результаты сравнения модельных и реечных измерений представлены в таблице 1. СКО составило 2,3 мм, коэффициент корреляции — 0,94, что свидетельствует о сильной статистической связи между методами. Сравнение проведено в два этапа. Сначала мы оценили, насколько близки значения глубины, полученные по модели и по рейке (табл. 1).

Таблица 1

Точность определения максимальной глубины колеи

| Показатель                               | Участок № 1 (А-114) | Участок № 2 (Р-21) | По двум участкам |
|------------------------------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| Количество контрольных сечений           | 101                 | 101                | 202              |
| Среднее расхождение «модель – рейка», мм | 1,4                 | 1,9                | 1,7              |
| СКО расхождений, мм                      | 2,1                 | 2,5                | 2,3              |
| Максимальное расхождение, мм             | 4,8                 | 6,3                | 6,3              |
| Коэффициент корреляции Пирсона           | 0,95                | 0,92               | 0,94             |

График на рисунке 1 наглядно демонстрирует, что точки плотно группируются вокруг линии равенства — это подтверждает тесную связь между обоими способами измерений.

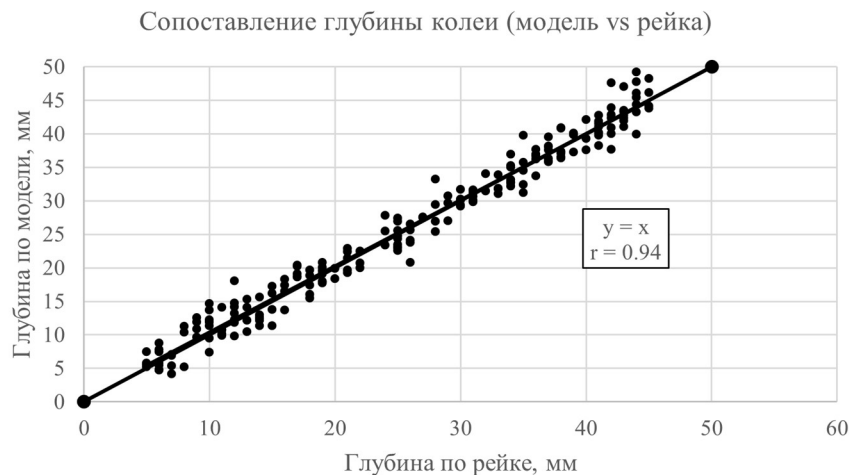


Рис. 1. Корреляция измерений (рейка vs МЛС) (иллюстрация авторов)

Fig. 1. Correlation of measurements (rail vs. MLS) (illustration by the authors)

*Полнота выявления дефектов*

Оценена полнота выявления метровых сечений с глубиной колеи более 15 мм. В качестве порога использовано значение, соответствующее методическим рекомендациям ОДМ 218.2.075-2016 для назначения ремонтных работ; нормативные значения по ГОСТ Р 50597-2017 (табл. 5.3) дифференцированы по категориям дорог и составляют 20–30 мм. Результаты сведены в таблицу 2.

Таблица 2

## Полнота выявления колеи глубиной &gt;15 мм

| Показатель                                | Количество сечений |
|-------------------------------------------|--------------------|
| Эталон (рейка) – сечений с колесей >15 мм | 1247               |
| Обнаружено моделью                        | 1164               |
| Не обнаружено (пропуск)                   | 83                 |
| Ложные срабатывания                       | 42                 |
| Полнота (Recall)                          | 0,93               |
| Точность (Precision)                      | 0,97               |

Все сечения с глубиной колеи более 20 мм были обнаружены (полнота 1,00). На рисунке 2 приведена карта глубин колеи на характерном участке протяжённостью 500 м.

## Карта глубин колеи (участок А-114, км 45+000 – 45+500)



Рис. 2. Карта глубин колеи по участку (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Map of rut depths along the section (illustration by the authors)

*Расчёт объёма колеи*

Полученные поперечные профили позволили сформировать ведомость объёмов работ — для этого мы проинтегрировали площади сечений вдоль трассы. Фрагмент такой ведомости представлен в таблице 3.

Таблица 3

## Ведомость объёмов работ по ликвидации колеи (участок А-114, км 45+000 – 46+000)

| Пикетаж начала, км+м | Пикетаж конца, км+м | Сторона колеи | Протяжённость, м | Средняя глубина, мм | Ширина колеи, м | Объём колеи, м³ |
|----------------------|---------------------|---------------|------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| 45+000               | 45+050              | Левая         | 50               | 14                  | 0,60            | 0,42            |
| 45+000               | 45+050              | Правая        | 50               | 16                  | 0,60            | 0,48            |
| 45+050               | 45+100              | Левая         | 50               | 18                  | 0,65            | 0,59            |
| 45+050               | 45+100              | Правая        | 50               | 15                  | 0,60            | 0,45            |
| 45+100               | 45+150              | Левая         | 50               | 22                  | 0,70            | 0,77            |
| 45+100               | 45+150              | Правая        | 50               | 19                  | 0,65            | 0,62            |
| 45+150               | 45+200              | Левая         | 50               | 17                  | 0,60            | 0,51            |
| 45+150               | 45+200              | Правая        | 50               | 14                  | 0,60            | 0,42            |
| 45+200               | 45+250              | Левая         | 50               | 20                  | 0,65            | 0,65            |
| 45+200               | 45+250              | Правая        | 50               | 21                  | 0,70            | 0,74            |
| 45+250               | 45+300              | Левая         | 50               | 15                  | 0,60            | 0,45            |
| 45+250               | 45+300              | Правая        | 50               | 18                  | 0,65            | 0,59            |
| 45+300               | 45+350              | Левая         | 50               | 23                  | 0,70            | 0,81            |
| 45+300               | 45+350              | Правая        | 50               | 16                  | 0,60            | 0,48            |

Окончание таблицы 3

|        |        |        |      |    |      |       |
|--------|--------|--------|------|----|------|-------|
| 45+350 | 45+400 | Левая  | 50   | 13 | 0,55 | 0,36  |
| 45+350 | 45+400 | Правая | 50   | 20 | 0,65 | 0,65  |
| 45+400 | 45+450 | Левая  | 50   | 19 | 0,65 | 0,62  |
| 45+400 | 45+450 | Правая | 50   | 22 | 0,70 | 0,77  |
| 45+450 | 45+500 | Левая  | 50   | 24 | 0,70 | 0,84  |
| 45+450 | 45+500 | Правая | 50   | 17 | 0,60 | 0,51  |
| 45+500 | 45+550 | Левая  | 50   | 16 | 0,60 | 0,48  |
| 45+500 | 45+550 | Правая | 50   | 25 | 0,75 | 0,94  |
| 45+550 | 45+600 | Левая  | 50   | 21 | 0,70 | 0,74  |
| 45+550 | 45+600 | Правая | 50   | 14 | 0,55 | 0,39  |
| 45+600 | 45+650 | Левая  | 50   | 18 | 0,65 | 0,59  |
| 45+600 | 45+650 | Правая | 50   | 23 | 0,70 | 0,81  |
| 45+650 | 45+700 | Левая  | 50   | 12 | 0,55 | 0,33  |
| 45+650 | 45+700 | Правая | 50   | 19 | 0,65 | 0,62  |
| 45+700 | 45+750 | Левая  | 50   | 25 | 0,75 | 0,94  |
| 45+700 | 45+750 | Правая | 50   | 18 | 0,65 | 0,59  |
| 45+750 | 45+800 | Левая  | 50   | 17 | 0,60 | 0,51  |
| 45+750 | 45+800 | Правая | 50   | 22 | 0,70 | 0,77  |
| 45+800 | 45+850 | Левая  | 50   | 20 | 0,65 | 0,65  |
| 45+800 | 45+850 | Правая | 50   | 16 | 0,60 | 0,48  |
| 45+850 | 45+900 | Левая  | 50   | 14 | 0,60 | 0,42  |
| 45+850 | 45+900 | Правая | 50   | 26 | 0,75 | 0,98  |
| 45+900 | 45+950 | Левая  | 50   | 22 | 0,70 | 0,77  |
| 45+900 | 45+950 | Правая | 50   | 20 | 0,65 | 0,65  |
| 45+950 | 46+000 | Левая  | 50   | 13 | 0,55 | 0,36  |
| 45+950 | 46+000 | Правая | 50   | 18 | 0,60 | 0,54  |
| Итого  | 1 км   | Левая  | 1000 | –  | –    | 10,21 |
| Итого  | 1 км   | Правая | 1000 | –  | –    | 11,08 |
| Всего  | 1 км   | Обе    | 2000 | –  | –    | 21,29 |

Разработанная математическая модель имеет следующие преимущества перед существующими подходами:

1. Отсутствие требования к проектной документации. Эталонная поверхность реконструируется непосредственно по данным МЛС по зонам наката, что критически важно для объектов ремонта, где проект часто отсутствует или не соответствует фактическому состоянию.

2. Анализ расхождений между моделью и рейкой показал, что максимальные отклонения (до 6,3 мм) наблюдаются на участках с резким изменением поперечного уклона (в начале виража) и в местах с локальными выбоинами, которые рейка могла зафиксировать иначе. На прямых участках с ровной колеей расхождение не превышает 3 мм. Статистика по 202 сечениям: 85 % сечений имеют расхождение менее 3 мм, 10 % – от 3 до 5 мм, 5 % – более 5 мм.

3. Корректный учёт фактического уклона дороги. Раздельная аппроксимация левой и правой зон наката позволяет учитывать вираж и продольный уклон, в отличие от методов, использующих нормативный поперечный уклон (20 %) [29-30], которые дают систематическую ошибку 10–15 мм.

4. Устойчивость к локальным повреждениям. Эталонная линия в поперечном профиле, по которой рассчитывается колейность становится нечувствительной к одиночным дефектам покрытия (выбоины, трещины и сколы) из-за использования скользящего окна шириной 5 метров и также из-за аппроксимации по зонам наката.

5. Расчет по объему колейности происходит напрямую с помощью численного интегрирования разности профилей. Точность (СКО 2,3 мм) находится в пределах погрешности реечных измерений ( $\pm 2$  мм) и полностью соответствует нормативным требованиям геодезического контроля производства. Затраты по времени на 1 км составляет всего 0,3 чел.-ч относительно 12 чел.-ч при традиционной съемке.

6. Существующие нейросетевые методы (например, PointNet++ или RandLA-Net) могут эффективно классифицировать точки покрытия и даже выделять колею, но для получения количественных значений глубины и объёма они обычно требуют дополнительной постобработки. Кроме того, они чувствительны к разреженности (а это необходимо делать в связи с избыточным количеством отснятых точек) облака и требуют больших размеченных датасетов. Предлагаемая модель не требует обучения и даёт обусловленный результат, что делает её более надёжной для инженерных задач.

#### 4. Заключение

По итогам исследования можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный способ восстановления эталонной поверхности автомобильной дороги позволяет отказаться от проектных данных. В отличие от нормативных данных с уклоном 20 ‰, который даёт на виражах ошибку около 15 мм, данный способ даёт стабильные результаты при любом поперечном профиле на всём протяжении автомобильной дороги и не чувствителен к одиночным дефектам (выбоины, трещины и сколы).

2. Разработан метод, позволяющий заменить ручной контроль автоматизированным расчётом по МЛС для участков от 1 км без потери точности. Глубина колеи измеряется с СКО 2,3 мм, коэффициент корреляции с реечными промерами по ГОСТ 30412-96 равен 0,94. В отличие от дискретных измерений рейкой, предложенный метод даёт непрерывный профиль, что критически важно для выявления равномерной колейности, которая может остаться незамеченной при точечных замерах. Кроме того, автоматизированный расчёт более объективен и не зависит от квалификации оператора.

3. Численное интегрирование разности профилей по длине и ширине колеи даёт непосредственное значение объёма дефекта в кубических метрах. Объём колеи, полученный интегрированием, служит основой для расчёта объёмов фрезерования и укладки выравнивающего слоя на участках, где ремонт выполняется методом «профильной» фрезеровки. При этом для точной картограммы фрезерования необходимо дополнительное построение поверхности по всему поперечному профилю, что является следующим этапом исследований. На примере участка А-114 (км 45 – км 46) было выявлено, что суммарный объём колеи составил 21,29 м<sup>3</sup>. Самый важный момент, на который стоит уделить внимание это необходимость раздельного учета сторон при составлении смет, потому что в ходе расчета по данному участку было произведено разделение на левую – 10,21 м<sup>3</sup> и правую полосу – 11,08 м<sup>3</sup>, исходя из этого если проигнорировать данный момент, неизбежно это приведет к ошибке в объемах работ порядка 5-10%, что существенно для крупных контрактов.

4. Экспериментальная проверка на участках двух автомобильных дороги общей протяженностью 10 км показала, что полнота выявления метровых отрезков с глубиной колеи свыше 15 мм (порог по ОДМ 218.2.075-2016) составляет 93%, а для дефектов более 20 мм достигает 100%. Было проведено сравнение по трудоемкости, которое составляет при обработке МЛС на 1 км – 0,3 чел.-ч против 12 чел.-ч при реечных измерениях. Значение 0,3 чел.-ч было получено хронометражем обработки 1 км трассы на этапе расчёта колейности после выполнения всех предварительных процедур (классификация, уравнивание). Значение 12 чел.-ч соответствует трудоёмкости полевых измерений рейкой по ГОСТ 30412-96 с шагом 50 м на том же участке (включая перемещение бригады, расстановку рейки и запись результатов). Данный факт делает разработанную модель пригодной для широкого применения при инженерных изысканиях

при ремонте или реконструкции автомобильных дорог. Высокая производительность обеспечивается прежде всего автоматизацией вычислений после выполнения лазерного сканирования. Для организаций, которые занимаются разработкой проектов данный факт означает сокращение полевых расходов и возможность обследования гораздо больших объемов автомобильных дорог в кратчайшие сроки, а также безопасность сотрудников компании при изысканиях.

5. Разработанная модель готова к использованию при проектировании ремонтов автомобильных дорог, особенно в ситуациях, когда проектная документация отсутствует или неактуальна. Дальнейшие направления исследований включают адаптацию модели к другим видам деформаций, такие как: просадки, наплывы, а также выделение зон наката при стертой разметке, что наиболее актуально при ремонте автомобильных дорог из-за значительного количества ненормативных состояний покрытий асфальтобетона в регионах и городах РФ. Для решения последней задачи перспективно применение методов машинного обучения по интенсивности облака точек, что позволит идентифицировать зоны наката даже при отсутствии маркеров на автомобильных дорогах.

#### Список литературы / References

1. Алтынцев М.А., Каркокли Х.М.С. Методика автоматизированной фильтрации данных мобильного лазерного сканирования // Вестник СГУГиТ (Сибирского государственного университета геосистем и технологий). 2021. Т. 26. Вып. 3. С. 5-19. DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-3-5-19.  
Altynytsev M. A., Karkokli H.M.S. Methodology for automated filtering of mobile laser scanning data // Bulletin of SSUGT. 2021. Vol. 26. Iss. 3. P. 5-19. DOI 10.33764/2411-1759-2021-26-3-5-19.
2. Yong-hua S., Xu-qing Z., Xue-feng N., Guo-dong Y., Ji-Kai Z. Denoising algorithm of airborne LIDAR point cloud based on 3D grid // International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition. 2017. Vol. 10. Iss. 2. P. 85–92.
3. Han X.-F., Jin J. S., Wang M.-J., Jiang W., Gao L., Xiao L. A review of algorithms for filtering the 3D point cloud // Signal Processing: Image Communication. 2017. Vol. 57. P. 103–112.
4. Rakotosaona M.-J., Barbera V. L., Guerrero P., Mitra N. J., Ovsjanikov M. Pointcleannet: learning to denoise and remove outliers from dense point clouds // arXiv:1901.01060v3. 2019. P. 1–17.
5. Guan H., Li J., Yu Y., Wang C., Chapman M. Automated road information extraction from mobile laser scanning data // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2015. Vol. 16. No. 1. P. 194-205. DOI: 10.1109/TITS.2014.2328589
6. Chen Y., Wang H., Zhang Y., et al. Pothole detection using vehicle-mounted laser point cloud data // Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 2020. Vol. 146. Iss. 3. DOI: 10.1061/JPEODX.0000185.
7. Date H. Extraction of Vector Data of Region and Line-Type Defects on Road Surface from MMS Point Clouds // Journal of the Japan Society for Precision Engineering. 2023. Vol. 89. No. 1. P. 56-62. DOI: 10.2493/jjspe.89.56.
8. Kukko A., Kaartinen H., Hyypä J., Chen Y. Feasibility of Mobile Laser Scanning towards Operational Accurate Road Rut Depth Measurements // Remote Sensing. 2021. 13(4), 563. DOI: 10.3390/rs13040563.
9. Faisal A., Gargoum S. Automated Assessment of Pavement Rutting Using Mobile LiDAR Data // Transportation Research Record. 2023. DOI: 10.1177/03611981221104626.
10. Faisal A., Gargoum S. Tile-Based Pavement Rutting and Roughness Evaluation Using Mobile LiDAR Data // Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements. 2025. 151(3), 234. DOI: 10.1061/JPEODX.PVENG-1573.
11. Shatnawi A., Al-Khateeb G. Road Pavement Rut Detection Using Mobile and Static Terrestrial Laser Scanning // Applied Geomatics. 2021. Vol. 13. P. 1-15. DOI: 10.1007/s12518-021-00398-1.

12. Wang H., Zhang Y., Chen Y. 3D Rutting Features Extraction Through Continuous Pavement Laser Point Cloud // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2022. Vol. 15. P. 1342-1353. DOI: 10.1007/s42947-022-00135-0.
13. Li X., Wang C., Li J., et al. Rutting extraction from vehicle-borne laser point clouds // *Measurement*. 2024. Vol. 236, 115067. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115067.
14. Алтынцев М.А., Каркокли Х.М.С. Методика выделения дорожной разметки из облаков точек мобильного лазерного сканирования // *Геодезия и картография*. 2022. № 7. С. 44-52. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-985-7-44-52.  
Altynntsev M.A., Karkokli H.M.S. Methodology for Extracting Road Markings from Mobile Laser Scanning Point Clouds // *Geodesy and Cartography*. 2022. No. 7. P. 44-52. DOI: 10.22389/0016-7126-2022-985-7-44-52.
15. Баженов А.И., Казаков А.А. Оценка колейности асфальтобетонных покрытий по данным наземного лазерного сканирования // *Дороги и мосты*. 2023. № 1(45). С. 112-120. DOI: 10.24412/2227-1841-2023-1-112-120.  
Bazhenov A.I., Kazakov A.A. Assessment of Asphalt Concrete Pavement Rutting Based on Terrestrial Laser Scanning Data // *Roads and Bridges*. 2023. No. 1(45). P. 112-120. DOI: 10.24412/2227-1841-2023-1-112-120.
16. Lyu N., Cao Y., Wu C., Xu J., Xie L. The effect of gender, occupation and experience on behavior while driving on a Freeway Deceleration Lane based on Field Operational Test Data. *Accid. Anal. Prev.* 2018. 121. P. 82–93.
17. Zeybek M., Bigici S. Point cloud filtering and road geometry extraction from MLS data // *ISPRS Archives*. 2023. Vol. XLVIII-1/W1-2023. P. 123-130. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W1-2023-123-2023.
18. Pu S., Rutzinger M., Vosselman G., Oude Elberink S. Recognizing basic structures from mobile laser scanning data for road inventory studies // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2011. Vol. 66. Iss. 6. P. S28-S39. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2011.01.002.
19. Guan H., Li J., Yu Y., et al. Road Rutting Measurement Using Mobile LiDAR Systems Point Cloud // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2019. 8(9), 365. DOI: 10.3390/ijgi8090365.
20. Kumar P., Lewis P., McElhinney C.P. A review of LiDAR applications in transportation // *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*. 2017. P. 1-7. DOI: 10.1109/ICTIS.2017.8047797.
21. Гребенюк Е.А., Ротков С. И., Талипова Л. В., Морозова Е. В. Методика оценки качества облаков точек по условию плотности // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2024. Т. 21. № 11(245). С. 19-26. DOI 10.14489/vkit.2024.11.pp.019-026. – EDN MOBMEL.  
Grebenyuk E. A., Rotkov S. I., Talipova L. V., Morozova E. V. Methodology for assessing the quality of point clouds based on the density condition // *Bulletin of Computer and Information Technologies*. 2024. Vol. 21, No. 11 (245). P. 19-26. DOI 10.14489/vkit.2024.11. P.019-026. – EDN MOBMEL.
22. Гребенюк Е.А., Ротков С. И., Талипова Л. В., Морозова Е. В. Моделирование зависимости плотности облаков точек от скорости съемки // *Вестник компьютерных и информационных технологий*. 2024. Т. 21. Т. 12. Вып. 246. С. 28-35. DOI 10.14489/vkit.2024.12.pp.028-035. – EDN OFVWWI.  
Grebenyuk E.A., Rotkov S. I., Talipova L. V., Morozova E. V. Modeling the dependence of point cloud density on shooting speed // *Bulletin of Computer and Information Technologies*. 2024. Vol. 21. Vol. 12. Iss. 246. P. 28-35. DOI 10.14489/vkit.2024.12.pp.028-035.
23. Пугачев И. Н., Капский Д.В. Разработка планов устойчивой городской мобильности и цифровая трансформация в области организации дорожного движения, путь к дальнейшему развитию городов и страны в целом // *Мир транспорта и технологических машин*. 2023. № 3-2(82). С. 92-99. DOI 10.33979/2073-7432-2023-3-2(82)-92-99.  
Pugachev I. N., Kapsky D. V. Development of sustainable urban mobility plans and digital transformation in the field of traffic management, the way to further development

- of cities and the country as a whole // The World of Transport and Technological Machines. 2023. No. 3-2 (82). P. 92-99. DOI 10.33979/2073-7432-2023-3-2 (82) -92-99.
24. Талипова Л.В., Лазарев Ю.Г. Методика применения геоинформационных систем для объектов транспортной инфраструктуры // Известия КГАСУ. 2025. № 2(72). С. 291-300. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.26.  
The methodology of using geoinformation systems for transport infrastructure facilities // News of KSUAE. 2025. Vol. 2(72). P. 291-300. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.26.
25. Yang B., Dong Z., Zhao G., Dai W. Road surface detection and segmentation from mobile laser scanning point clouds // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2021. Vol. 178. P. 194-207. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.06.007.
26. Wang C., Li J., Yang B. Road surface defect detection using deep learning and mobile laser scanning data // Automation in Construction. 2022. Vol. 135, 104117. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104117.
27. Zhang Y., Wang H., Chen Y. A critical review on pavement distress detection using images and point clouds: from visual features to geometric modeling // Journal of Road Engineering. 2025. Vol. 5. Iss. 1. P. 1-15. DOI: 10.1016/j.jreng.2024.12.001.
28. Pan Y., Magistri F., Läbe T., Marks E., Smitt C., McCool C., Behley J., Stachniss C. Mobile laser scanning for road inspection: a review of methods and applications // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2023. Vol. 203. P. 45-62. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2023.08.005.
29. Du J., Ma L., Li J., Qin N., Zelek J., Guan H., Li J. Automatic extraction of road markings from mobile laser scanning data // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 2024. Vol. 25. No. 2. P. 1234-1245. DOI: 10.1109/TITS.2023.3300389.
30. Liu Y., Zhang Y., Wang H. Pavement rutting detection and measurement using mobile LiDAR point cloud // International Journal of Pavement Engineering. 2023. Vol. 24. Iss. 1. DOI: 10.1080/10298436.2023.2177688.

#### Информация об авторах

**Васильев Кирилл Андреевич**, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
E-mail: vkirill99@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1013-2029

**Лазарев Юрий Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация  
E-mail: lazarev\_yug@spbstu.ru, ORCID: 0000-0002-5616-1191

#### Information about the authors

**Kirill A. Vasilev**, post-graduate student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation  
E-mail: vkirill99@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-1013-2029

**Yuriy G. Lazarev**, doctor of technical sciences, professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation  
E-mail: lazarev\_yug@spbstu.ru, ORCID: 0000-0002-5616-1191

*Дата поступления: 10.07.2026*

*Дата принятия: 29.09.2026*