

Оригинальная статья / Original article

УДК 625.7:004.9

<https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-71-91>

Метод мониторинга состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и аппарата нечеткой логики

К. Е. Баданис¹✉, Н. Ю. Фирсов¹, А. А. Шамраев¹

¹ Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
ул. Победы, д. 85, Белгород 308015, Российская Федерация

✉ e-mail: badanis@bsuedu.ru

Резюме

Цель исследования. Целью настоящего исследования является повышение точности мониторинга состояния дорожного покрытия городской агломерации за счет анализа сигналов акселерометра в реальном времени на основе разрабатываемого комплексного метода оценки показателей ровности.

Методы. В настоящем исследовании применялись следующие методы: анализ существующих методов мониторинга состояния дорожного покрытия; методы и алгоритмы фильтрации шумов сигналов акселерометра (разработана и описана модель предобработки сигналов акселерометра включающая в себя фильтр низких частот Баттерворта, медианный фильтр, метод экспоненциального сглаживания и расчет пороговых значений); алгоритмы нечеткой логики (разработана модель классификации состояния дорожного покрытия по 5 категориям); имитационное моделирование (проведены тестовые заезды с использованием авторской имитационной модели разработанной в среде Unity).

Результаты. Представленный метод обеспечивает автоматизированный мониторинг состояния дорожного покрытия с точностью не менее 93%, и возможность интеграции в систему умного города. Метод позволяет проводить мониторинг состояния дорожного покрытия в реальном времени, а классифицирование состояния дорожного покрытия несет рекомендационный характер для проведения ремонта дорог. Перспективы исследования включают проведение натурного эксперимента, визуализацию данных с привязкой к карте города, а также применение алгоритмов траекторной кластеризации для определения общих траекторий движения ТС в моменты объезда неровностей.

Заключение. На основе разработанного метода мониторинга состояния дорожного покрытия, получена интегральная оценка соответствия точности мониторинга состояния дорожного покрытия не менее 93%.

Ключевые слова: дорожное покрытие; сигналы акселерометра; краудсенсоринг; нечеткая логика; мониторинг.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Для цитирования: Баданис К. Е., Фирсов Н. Ю., Шамраев А. А. Метод мониторинга состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и аппарата нечеткой логики // Известия Юго-Западного государственного университета. 2025; 29(2): 71-91. <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-71-91>.

Поступила в редакцию 09.06.2025

Подписана в печать 21.06.2025

Опубликована 23.07.2025

Method of monitoring the condition of road surface based on accelerometer signals and fuzzy logic apparatus

Kirill Ye. Badanis¹✉, Nikita Yu. Firsov¹, Anatoly A. Shamraev¹

¹ Belgorod State National Research University
85, Pobedy str., Belgorod 308015, Russian Federation

✉ e-mail: badanis@bsuedu.ru

Abstract

Purpose of research. The purpose of this research is to improve the accuracy of monitoring the condition of the road surface of an urban agglomeration by analyzing accelerometer signals in real time based on the developed integrated method for assessing evenness indicators.

Methods. The following methods were used in this research: analysis of existing methods for monitoring road surface conditions; methods and algorithms for filtering accelerometer signal noise (a model for preprocessing accelerometer signals was developed and described, including a Butterworth low-pass filter, a median filter, an exponential smoothing method, and calculation of threshold values); fuzzy logic algorithms (a model for classifying road surface conditions into 5 categories was developed); simulation modeling (test runs were conducted using the author's simulation model developed in the Unity environment).

Results. The presented method provides automated monitoring of the road surface condition with an accuracy of at least 93%, and the possibility of integration into the smart city system. The method allows monitoring the road surface condition in real time, and the classification of the road surface condition is of a recommendatory nature for road repairs. The prospects of the research include conducting a full-scale experiment, visualizing data with reference to a city map, and using trajectory clustering algorithms to determine the general trajectories of a vehicle when going around uneven surfaces.

Conclusion. Based on the developed method of monitoring the condition of the road surface, an integrated assessment of the compliance of the accuracy of monitoring the condition of the road surface of at least 93% was obtained.

Keywords: road surface; accelerometer signals; crowdsensing; fuzzy logic; monitoring.

Conflict of interest. The Authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

For citation: Badanis K. Ye., Firsov N. Yu., Shamraev A. A. Method of monitoring the condition of road surface based on accelerometer signals and fuzzy logic apparatus. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Southwest State University*. 2025; 29(2): 71-91 (In Russ.). <https://doi.org/10.21869/2223-1560-2025-29-2-71-91>.

Received 09.06.2025

Accepted 21.06.2025

Published 23.07.2025

Введение

Состояние дорожного покрытия напрямую влияет на безопасность движения, износ транспортных средств (далее – ТС) и экономику городской агломерации. Для получения наиболее точной и

объективной информации о состоянии дорожного покрытия применяются различные инструменты и методы контроля диагностических показателей. При этом важно учитывать, что все измерительные приборы имеют определенные погреш-

ности, которые отражаются в многочисленных математических моделях¹.

Специалистам дорожных служб необходимо периодически контролировать состояние городских дорог, чтобы своевременно устранять возникающие дефекты и минимизировать расходы на ремонт. Дефекты дорожного покрытия представляют собой различные виды, такие как выбоины, колеи и прочие повреждения, которые препятствуют ровности дороги. Затягивание с их устранением ускоряет деградацию дорожного покрытия, увеличивает затраты на ремонт и обслуживание дорожной сети в целом [1].

Традиционные методы мониторинга, такие как лазерные профилометры, обладают высокой точностью, но требуют значительных ресурсов [2,3]. Альтернативные подходы, такие как краудсенсоринг [4, 5-7], а также использование встроенных датчиков в смартфонах [8] показывают потенциал, но страдают от шумов, низкой интерпретируемости сигналов, а главное, являются трудно масштабируемыми в нашей стране.

Целью настоящего исследования является повышение эффективности мониторинга состояния дорожного покрытия городской агломерации за счет ежедневного анализа динамики изменений

его состояния на основе разрабатываемого комплексного метода оценки показателей ровности.

Материалы и методы

Традиционные подходы к мониторингу дорожного покрытия включают ручные методы, где задействуются специалисты для проведения полевых измерений [9], и полуавтоматические системы, использующие специализированные ТС с установленными техническими средствами. Однако ручные методы являются трудоемкими и требуют значительных временных затрат, что нередко приводит к задержкам в проведении ремонтных работ [10, 11]. Кроме того, эти методы создают неудобства для дорожного движения, включая частичное или полное перекрытие полос движения. Полуавтоматические методы, несмотря на повышение эффективности, сопряжены с высокими финансовыми и временными затратами.

Модель классификации состояния дорожного покрытия основана на анализе данных об ускорениях, измеренных по трем осям (X, Y, Z). Данные обрабатываются путем использования фильтра низких частот Баттервортса, медианного фильтра, метода экспоненциального сглаживания и расчета пороговых значений. Далее с целью классифицировать состояние дорожного покрытия используется метод дефазификации по центру масс и алгоритмы аппарата нечеткой логики.

Основная цель модели – определить состояние дорожного покрытия как:

¹ Бендер О. А. Оценка и прогнозирование рисков в системе инструментального контроля транспортно-эксплуатационного состояния автомобильных дорог: дис. ... канд. наук. Новосибирск, 2013;

Пат. 2614836 С1. МПК E01C 23/07. Ru. Автомобильное устройство для измерения коэффициента сцепления дорожных покрытий / Бородин К. С. 2017.

- «очень плохое – требуется вне-плановый капитальный ремонт»;
- «плохое – требуется капитальный ремонт»;
- «среднее – требуется комплексный текущий ремонт»;
- «хорошее – требуется выборочный текущий ремонт»;
- «очень хорошее – наблюдение».

Процесс обработки сигналов акселерометра начинается с исключения вибрационных частот. Для этого используется фильтр нижних частот Баттервортса (Butterworth Low-Pass Filter), позволяющий избежать искажения полезной информации при удалении шума [12, 13]. Низкочастотный фильтр пропускает сигналы низких частот и задерживает сигналы высоких частот. В общем случае определим полосу пропускания как интервал частот $0 < f < f_c$, полосу задерживания как частоты $f > f_1$, переходную область как диапазон частот $f_c < f < f_1$, где f_c – частота среза [14, 15]. Для каждой оси (X , Y , Z) применяется следующее рекуррентное уравнение:

$$y[n] = \alpha \cdot x[n] + (1 - \alpha) \cdot y[n-1], \quad (1)$$

где $x[n]$ – входной сигнал (текущее значение ускорения) в момент времени n ; $y[n]$ – отфильтрованный выходной сигнал в момент времени n ; $y[n-1]$ – предыдущее отфильтрованное значение, α – коэффициент сглаживания. Коэффициент сглаживания рассчитывается следующим образом:

$$\alpha = \frac{2\pi f_c \Delta t}{1 + 2\pi f_c \Delta t}, \quad (2)$$

где $\Delta t = \frac{1}{f_s}$ – интервал дискретизации (f_s – частота дискретизации); f_c – частота среза фильтра.

Фильтр нижних частот реализован и настроен с помощью параметров, таких как частота среза (f_c) и частота дискретизации (f_s). В данном случае выбраны значения $f_c = 1$ Гц и $f_s = 100$ Гц, что обеспечивает оптимальный баланс между подавлением шума и сохранением полезного сигнала [16]. Общая формула для вычисления выходного сигнала $y[n]$ имеет вид:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \cdot x[n-k], \quad (3)$$

где $y[n]$ – значение выходного сигнала в момент времени n ; $x[n]$ – входной сигнал; $h[k]$ – коэффициенты фильтра (импульсная характеристика); N – порядок фильтра (количество коэффициентов).

Низкочастотный фильтр Баттервортса удобен для применения в задачах оценки состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра, благодаря своей способности работать с потоковыми данными в реальном времени. Данная возможность делает его подходящим для интеграции в системы мониторинга, использующие данные акселерометров [17].

Далее для устранения шумов, вызванных внешними помехами (напри-

мер, изношенной подвеской ТС), используется медианный фильтр (Median Filter)¹ [16]. Он позволяет сохранить граничные значения и другие важные особенности сигналов акселерометра, что делает его предпочтительным выбором по сравнению с другими методами фильтрации, такими как скользящее среднее (Moving Average), которое может размывать полезные данные [18]. Метод медианной фильтрации требует минимальных вычислительных ресурсов, что особенно важно для систем реального времени, где требуется быстрая обработка данных [19], что подтверждается исследованиями, демонстрирующими его эффективность в сочетании с другими методами предобработки данных [20]. Для каждого элемента массива данных берется окно размером (w), и выбирается медианное значение:

$$y[i] = \text{Median}\left(x\left[i - \frac{w}{2}, i + \frac{w}{2}\right]\right), \quad (4)$$

где $\text{Median}(\cdot)$ – функция, вычисляющая медиану набора чисел; w – размер окна фильтра.

Для уменьшения высокочастотных компонентов шума в данных ускорений акселерометра используется метод экспоненциального сглаживания (Exponential Smoothing) [21]. Метод позволяет эффективно устраниć высокочастотные колебания, сохраняя при этом низкоча-

стотные тренды, что особенно важно для анализа данных акселерометра. Это позволяет минимизировать влияние случайных шумов, вызванных внешними факторами, такими как вибрации ТС или незначительные неровности дорожного покрытия [20]. По сравнению с другими методами фильтрации, такими как фильтр Калмана (Kalman Filter), экспоненциальное сглаживание требует меньших вычислительных затрат и не требует хранения больших объемов данных, что делает этот метод идеальным для работы в реальном времени [22, 23]. Математическая формула вычисления экспоненциального сглаживания выглядит следующим образом:

$$S_t = \alpha \cdot X_t + (1 - \alpha) \cdot S_{t-1}, \quad (5)$$

где S_t – сглаженное значение в момент времени t ; X_t – исходное значение в момент времени t ; α – коэффициент сглаживания.

Коэффициент α может быть настроен для достижения баланса между чувствительностью к изменениям и подавлением шума. В данном случае выбран малый коэффициент ($\alpha = 0.01$), что обеспечивает высокую чувствительность к изменениям состояния дорожного покрытия при сохранении устойчивости к шуму [24].

На заключительном этапе предобработки сигналов акселерометра проводится расчет пороговых значений для каждого компонента ускорения (X , Y , Z), на основе медианных значений и стандартного отклонения данных ускорений, в данном случае:

¹ Макрецкий Александр Евгеньевич. Медианный фильтр. 1989 | Фридман, П. А. "Цифровой медианный фильтр." (1995).

$$\begin{aligned} Threshold_X &= Median(X) + \\ &+ 0.5 \cdot StandardDeviation(X) \\ Threshold_Y &= Median(Y) + \\ &+ 0.5 \cdot StandardDeviation(Y) \\ Threshold_Z &= Median(Z) + \\ &+ 0.5 \cdot StandardDeviation(Z) \end{aligned}$$

Чтобы начать процесс классификации состояния дорожного покрытия на основе предобработанных сигналов ускорений необходимо получить численную оценку веса общего показателя состояния дорожного покрытия. Для этого используется метод дефазификации по центру масс (Centroid Method). Метод центра масс является наиболее распространенным и теоретически обоснованным подходом к дефазификации, так как он учитывает все значения функции принадлежности и их распределение, что позволяет получить устойчивую и точную численную оценку [25-27]. Данный метод обеспечивает взвешенное среднее значение выходных переменных, что соответствует физическому смыслу задачи – определению «среднего» состояния дорожного покрытия на основе нечетких категорий [28]. Для расчета численной оценки веса общего показателя состояния дорожного покрытия используется следующая формула:

$$Def_{Value} = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot o_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_i}, \quad (6)$$

где μ_i – степень принадлежности; o_i – выходные значения (0, 1, 2, 3, 4).

Формула вычисления численной оценки веса общего показателя состояния до-

рожного покрытия интегрирована в общую модель классификации состояния дорожного покрытия, а также реализована программно¹, что делает метод удобным для применения в реальных системах мониторинга [29]. Для оценки степени принадлежности к различным категориям состояния дорожного покрытия используется алгоритм нечеткой логики (Fuzzy Logic), а именно триангулярная функция принадлежности [30]. Для процедуры дефазификации использовалась функция принадлежности триангулярного вида по пятиуровневой классификации с лингвистическими термами: «очень плохое», «плохое», «среднее», «хорошее», «очень хорошее». Триангулярное нечеткое число (Triangular Fuzzy Number) определяется триангулярной функцией принадлежности, имеющей вид [31, 32]:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} (x - l)/(m - l), & l \leq x \leq m \\ (u - x)/(u - m), & m < x \leq u \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}, \quad (7)$$

где l, u – нижняя и верхняя граница нечеткого числа \tilde{A} ; $m: l < m < u$. Тогда нечеткое число можно представить в виде: $\tilde{A} = (l, m, u)$.

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 202560467 Российской Федерации. Программа для анализа и классификации состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра : № 2025618750: заявл. 15.04.2025: опубл. 23.04.2025 / К.Е. Баданис, А.А. Шамраев; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

Для оценки степени принадлежности к различным категориям состояния дорожного покрытия используется следующее выражение:

$$\mu(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & \text{если } x \leq a \text{ или } x \geq c \\ (x - a)/(b - a) & \text{если } a < b < c \\ (c - x)/(c - b) & \text{если } b < x < c \\ 1 & \text{если } x = b \end{cases}.(8)$$

Для классификации состояния дорожного покрытия использовались триангулярные функции принадлежности, каждая из которых определяется тремя точками: нижней границей, центральной точкой и верхней границей. Параметры функций принадлежности для каждой категории были выбраны на основе анализа пороговых значений ускорений:

- «очень плохое – внеплановый капитальный ремонт»: точки функции: $(0.5 * xThreshold, 1.0 * xThreshold, 1.5 * xThreshold)$;
- «плохое – капитальный ремонт»: точки функции: $(0.5 * yThreshold, 1.0 * yThreshold, 1.5 * yThreshold)$;
- «среднее – комплексный текущий ремонт»: точки функции: $(0.5 * zThreshold, 1.0 * zThreshold, 1.5 * zThreshold)$, с коэффициентом усиления 1.5 для повышения чувствительности к средним неровностям;
- «хорошее – выборочный текущий ремонт»: точки функции: $(0, 0.5 * xThreshold, 1.0 * xThreshold)$;
- «очень хорошее – наблюдение»: точки функции: $(0, 0, 0.5 * xThreshold)$.

Все функции принадлежности были нормализованы и объединены в единую

шкалу оценки состояния дорожного покрытия от 0 до 4. В свою очередь, процесс дефазификации, проведенный методом центра масс (Centroid Method), позволил получить численную оценку общего состояния дорожного покрытия.

На рис. 1 представлена разработанная блок-схема алгоритма обработки сигналов ускорения ТС и классификации состояния дорожного покрытия.

Обработка данных осуществлялась с использованием сигналов акселерометра по трем осям: X (продольная), Y (поперечная) и Z (вертикальная). Частота дискретизации составляет 100 Гц, что обеспечивает достаточное разрешение для анализа мелких неровностей и крупных дефектов дорожного покрытия.

Как уже было отмечено, перед применением алгоритмов классификации данные проходили этап предобработки, включающий: фильтрацию высокочастотного шума с помощью фильтра Баттервортса (низкочастотный фильтр с частотой среза 1 Гц); медианную фильтрацию с окном размером 5 отсчетов для устранения импульсных помех; экспоненциальное сглаживание с коэффициентом $\alpha = 0.01$ для подавления случайных колебаний; вычисление пороговых значений на основе медианы и стандартного отклонения ускорений по каждой оси.

Результаты и их обсуждение

В рамках экспериментальной части исследования тестовые заезды проводились исключительно с использованием

авторской имитационной модели¹, разработанной в кроссплатформенной среде разработки Unity (рис. 2).

Модель позволяет симулировать различные типы дорожных покрытий и регистрировать показания виртуального акселерометра при движении ТС. Хотя модель адекватно воспроизводит реальные динамические характеристики движения ТС, следует отметить, что настоящий метод пока не проверен в условиях реального дорожного движения.

Сигналы акселерометра обработаны программой для анализа и классификации состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра², а категории метода сопоставлены с диапазонами международного индекса шероховатости IRI в табл. 1 на основе стандартов, предложенных в [33].

Для 150 участков дорог использованы данные, полученные с помощью имитационной модели и лазерного

¹ Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664460 Российской Федерации. Имитационная модель состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и местоположения транспортного средства: № 2025662201: заявл. 19.05.2025: опубл. 04.06.2025 / К.Е. Баданис, Н.Ю. Фирсов, А.А. Шамраев; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

² Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025664460 Российской Федерации. Имитационная модель состояния дорожного покрытия на основе сигналов акселерометра и местоположения транспортного средства: № 2025662201: заявл. 19.05.2025: опубл. 04.06.2025 / К.Е. Баданис, Н.Ю. Фирсов, А.А. Шамраев; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет».

профилометра (длина каждого участка: 100 м), данные получены из открытых баз данных [34]. Диапазон IRI: от 1.2 м/км до 8.7 м/км. Значения индекса IRI и категории метода мониторинга состояния дорожного покрытия представлены в табл. 2.

На рис. 3 представлена гистограмма распределения индекса IRI, которая показывает, сколько участков попадает в каждый диапазон индекса IRI.

Ось X разделена на диапазоны: $< 2,2 - 3,3 - 5,5 - 7, > 7$. Ось Y показывает количество участков в каждом диапазоне.

Для оценки адекватности метода проведен статистический анализ корреляции IRI, что позволит обосновать работоспособность и эффективность разрабатываемого метода. Сформулируем гипотезы:

- нулевая гипотеза (H_0): нет корреляции между категориями метода мониторинга состояния дорожного покрытия и диапазонами индекса IRI;
- альтернативная гипотеза (H_1): существует статистически значимая корреляция между категориями метода мониторинга состояния дорожного покрытия и индексом IRI.

Руководствуясь порядковыми данными категорий от «очень плохого» до «очень хорошего» состояния дорожного покрытия необходимо отметить, что для оценки корреляции лучше всего подойдет коэффициент ранговой корреляции Спирмена [35, 36]. Он позволяет оценить, насколько хорошо отношения между переменными можно описать монотонной функцией.

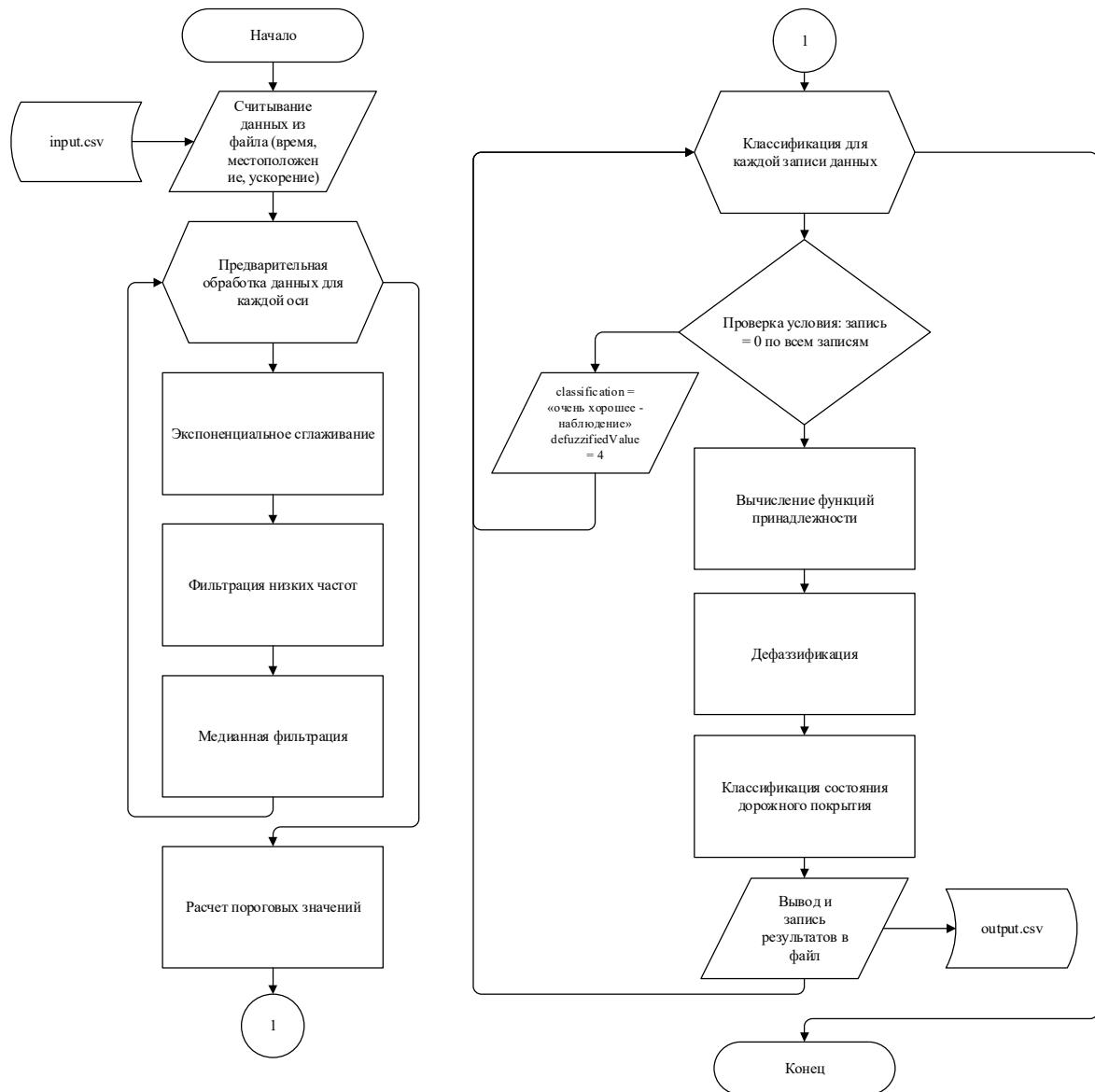


Рис. 1. Блок-схема алгоритма обработки сигналов ускорения ТС и классификации состояния дорожного покрытия

Fig. 1. Block diagram of the algorithm for processing vehicle acceleration signals and classifying road surface conditions

Категории метода мониторинга состояния дорожного покрытия и IRI имеют порядковую природу – ранговую шкалу. Коэффициент Спирмена позволит оценить, насколько монотонна связь между переменными.

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}, \quad (9)$$

где d_i – разность рангов между категорией модели и IRI для i -го участка; n – количество участков.

Рассчитаем коэффициент Спирмена для данных из табл. 2, сумма квадратов разностей равна:

$$\begin{aligned} \sum d_i^2 &= 0 + 0 + 0 + 1 + 1 + 4 + 4 + \\ &+ 36 + 36 + 25 \dots + 25 = 3607. \end{aligned}$$

**Рис. 2.** Имитационная модель Unity**Fig. 2.** Unity simulation model

Полученный результат подставим в формулу (9):

$$\rho = 1 - \frac{6 \times 3607}{150 \times (150^2 - 1)} = 1 - \frac{21642}{3374850} = \\ = 1 - 0.00641 = 0.9936.$$

Коэффициент $\rho = 0.9936$ указывает на очень сильную монотонную связь между категориями метода мониторинга состояния дорожного покрытия и индексом IRI.

Таблица 1. Сопоставление категорий модели и диапазонов IRI**Table 1.** Comparison of model categories and IRI ranges

Категория метода / Method Category	Диапазон IRI (м/км) / IRI Range (m/km)	Описание / Description
Очень хорошее – наблюдение	< 2	Минимальные неровности, высокая комфортность вождения
Хорошее – выборочный текущий ремонт	2 – 3	Умеренные неровности, приемлемое качество
Среднее – комплексный текущий ремонт	3 – 5	Заметные неровности, требуется профилактика
Плохое – капитальный ремонт	5 – 7	Серьезные дефекты, необходим ремонт дорожного покрытия
Очень плохое – внеплановый капитальный ремонт	> 7	Критическое состояние, аварийная опасность

Таблица 2. Значения IRI и категории метода**Table 2.** IRI values and method categories

Участок / Plot	IRI (m/km) / IRI (m/km)	Категория метода / Method category	Ранг IRI / RI rank	Ранг категории / Category rank	Разность рангов между категорией метода и IRI для i -го участка / Rank difference between the method category and the IRI for the i th site	Квадраты разностей / Squares of differences /
1	1.2	Очень хорошее	1	1	0	0
2	2.5	Хорошее	2	2	0	0
3	3.2	Среднее	3	3	0	0
4	4.0	Среднее	4	3	1	1
5	5.5	Плохое	5	4	1	1
6	6.0	Плохое	6	4	2	4
7	7.5	Очень плохое	7	5	2	4
8	2.0	Хорошее	8	2	6	36
9	3.8	Среднее	9	3	6	36
10	8.7	Очень плохое	10	5	5	25
...
150	8.0	Очень плохое	10	5	5	25

Проверим значимость коэффициента корреляции, используя t -статистику [35, 36]. Введем t -критерий для коэффициента Спирмена:

$$t = \rho \sqrt{\frac{n-2}{1-\rho^2}}. \quad (10)$$

Подставив значения в формулу (10), получим:

$$t = 0.9936 \times \sqrt{\frac{148}{1-0.9872}} =$$

$$0.9936 \times 107.5 = 106.8.$$

Для $\alpha = 0.05$ и степеней свободы $df = n-2 = 148$, критическое значение $t_{kрит} = 1.976$ по таблице t -распределения. Так как $t = 106.8 < 1.976$, гипотеза H_0 отвергается, что подтверждает наличие статистически значимой корреляции между категориями метода мониторинга состояния дорожного покрытия и индексом IRI (рис. 4).

В табл. 3 представлена матрица ошибок и точность метода для 150 участков.

На рис. 5 представлена визуализация матрицы ошибок в виде тепловой карты.

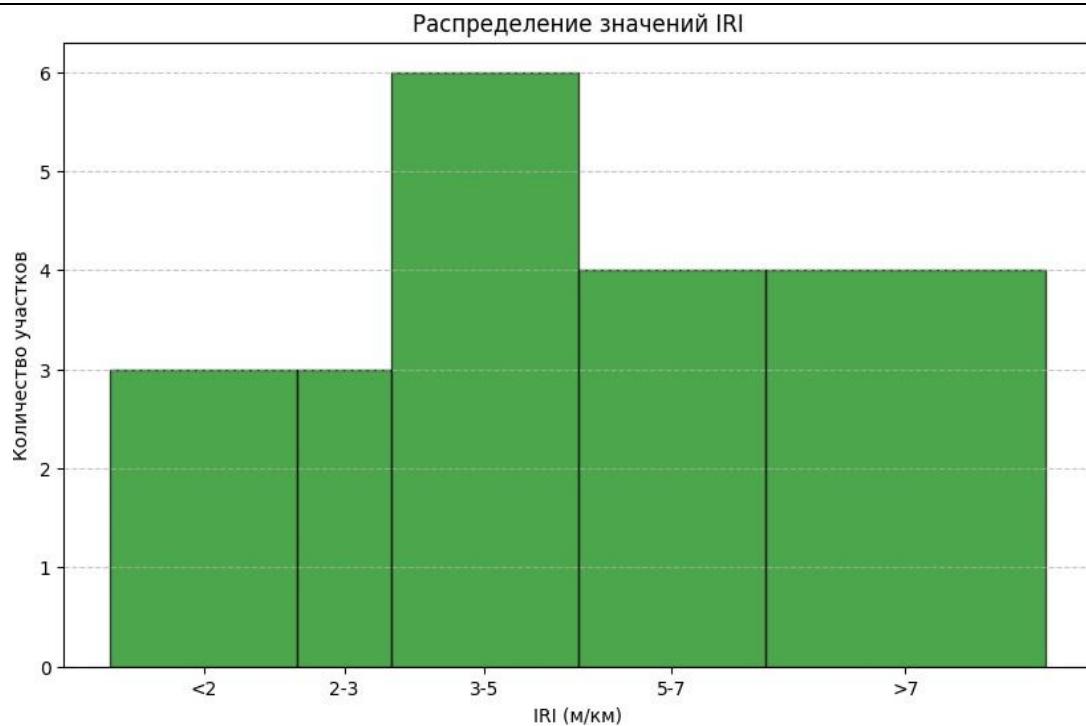
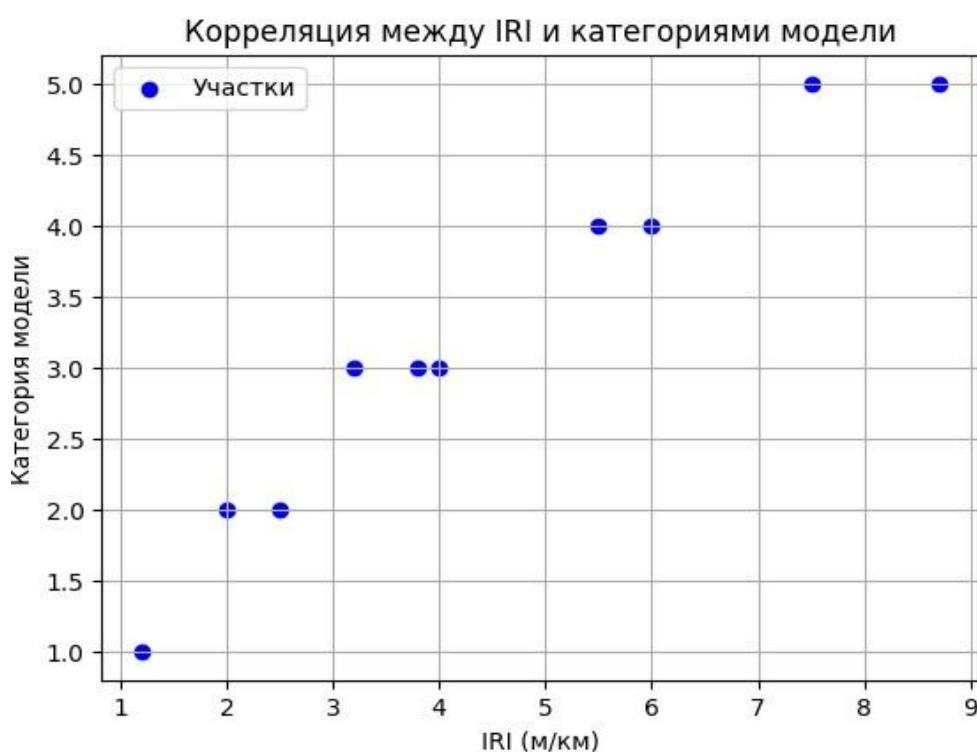
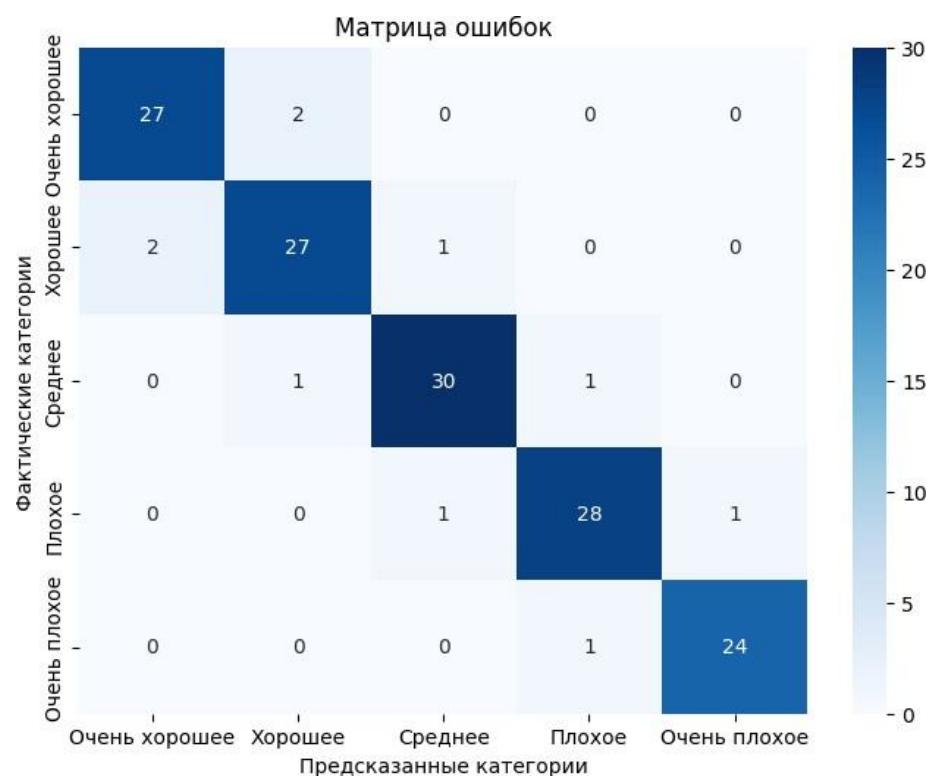
**Рис. 3.** Гистограмма распределения IRI**Fig. 3.** IRI distribution histogram**Рис. 4.** График корреляции между категориями метода и индексом IRI**Fig. 4.** Correlation graph between method categories and IRI index

Таблица 3. Матрица ошибок и метрики**Table 3.** Error matrix and metrics

	Очень хорошее (IRI <2) / Very good (IRI <2)	Хорошее (IRI 2–3) / Good (IRI 2–3)	Среднее (IRI 3–5) / Average (IRI 3–5)	Плохое (IRI 5–7) / The Bad (IRI 5–7)	Очень плохое (IRI >7) / Very bad (IRI >7)
Очень хорошее	27	2	0	0	0
Хорошее	2	27	1	0	0
Среднее	0	1	30	1	0
Плохое	0	0	1	28	1
Очень плохое	0	0	0	1	24

**Рис. 5.** Тепловая карта матрицы ошибок**Fig. 5.** Error matrix heat map

Тепловая карта показывает, насколько хорошо метод классифицирует каждую категорию. Цветовая шкала указывает на количество совпадений (более темные цвета – больше совпадений). Основные ошибки наблюдались между смеж-

ными категориями (например, «очень хорошее» и «хорошее», «плохое» и «среднее»), что связано с плавным переходом между состояниями дорожного покрытия и естественной неопределенностью в нечеткой логике.

Согласно проведенным расчетам, правильные предсказания: $27+27+30+28+24=136/150$. Точность метода: 91%. Рассчитаем среднее по классам ($F1$ -score) для категории – «очень хорошее»:

$$\text{Precision} = \frac{27}{27+2} = 0.93,$$

$$\text{Recall} = \frac{27}{27+3} = 0.9,$$

$$F1 = \frac{2 \times 0.93 \times 0.9}{0.93 + 0.9} = 0.915.$$

Аналогично для остальных категорий. Средний $F1$ -score: 0.916. Окончательная оценка точности осуществлена на основании данных 7640 выборок по формулам (7 и 8). Получена интегральная оценка соответствия точности не менее 93%. На рис. 6 представлено распределение участков дорожного покрытия по категориям.



Рис 6. Распределение участков по категориям

Fig. 6. Distribution of sections by categories

Для объективной оценки эффективности предложенного метода было проведено сравнение с двумя наиболее распространенными подходами к мониторингу состояния дорожного покрытия. Речь идет о краудсенсоринге на базе смартфонов и профессиональных мобильных лабораторий на основе лазерных профилометров. Основными критериями для сравнения

стали: точность, масштабируемость, стоимость реализации, возможность работы в реальном времени и применимость в условиях системы умного города. В табл. 4 представлены результаты сравнительного анализа предлагаемого метода с двумя наиболее распространенными подходами к мониторингу состояния дорожного покрытия.

Таблица 4. Сравнение с аналогами**Table 4.** Comparison with analogues

Критерий / Criterion	Мобильные лаборатории / Mobile Labs	Краудсенсоринг / Crowdsensing	Предлагаемый метод / Proposed method
Точность	95-98%	70-85%	93%
Масштабируемость	Низкая	Высокая	Высокая
Стоимость	Очень высокая	Низкая	Низкая
Реальное время	Нет	Да	Да
Интеграция в систему умного города	Ограниченнная	Ограниченнная	Высокая
Используемые датчики	Лазеры, сканеры, гироскопы	Датчики смартфона	Акселерометр, GPS-датчик

Как видно из табл. 4, предлагаемый метод демонстрирует высокую точность (93%), сравнимую с профессиональными решениями, при этом сохраняя низкую стоимость реализации, а также возможность масштабирования и интеграцию в систему умного города. Использование краудсенсоринга, основанного на данных с мобильных устройств водителей ТС, предполагает наличие в каждом ТС современного мобильного устройства (с датчиками GPS и акселерометра) и необходимость в согласии водителей на предоставление информации о своих перемещениях. Однако реализация подобных решений в настоящее время в нашей стране является практически невозможной. Более того, в отличие от краудсенсоринга, метод обеспечивает интерпретируемую классификацию состояния дорожного покрытия, основанную на нечеткой логике и стандартах индекса IRI,

что делает его более полезным для муниципальных дорожных служб.

Выводы

На основе разработанного комплексного метода оценки показателей ровности повышена точность мониторинга состояния дорожного покрытия городской агломерации за счет анализа динамики изменений его состояния в реальном времени. Разработана модель предобработки данных сигналов акселерометра (метод экспоненциального сглаживания, низкочастотный фильтр, медианный фильтр и среднеквадратичное значение); модель классификации состояния дорожного покрытия на основе применения алгоритмов нечеткой логики для классификации состояния дорожного покрытия. Получена интегральная оценка соответствия точности не менее 93%. Метод позволяет проводить ежедневный мониторинг состояния дорож-

ного покрытия, а классификация состояния дорожного покрытия несет рекомендационный характер для проведения ремонта дорог. Перспективы исследования включают проведение натурного эксперимента, визуализацию данных с

привязкой к карте города, а также применение алгоритмов траекторной кластеризации для определения общих траекторий движения ТС в моменты объезда неровностей.

Список литературы

1. Pavement Image Datasets: A New Benchmark Dataset to Classify and Densify Pavement Distresses / H. Majidifard, P. Jin, Y. Adu-Gyamfi, W.G. Buttler // Transp. Res. Rec. 2020. 674. P. 328–339.
2. Sayers M. W. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile // Transportation Research Record. 1995. № 1501.
3. Баданис К. Е. Технология Big Data и искусственный интеллект в управлении автомобильным трафиком // XXXVII Международная научно-практическая конференция «Современная наука: актуальные вопросы, достижения и инновации». Пенза, 2024. С. 73-77.
4. Sensing and Signal Processing for a Distributed Pavement Monitoring System / M. Ndoye, S. Vanjari, H. Huh, J. Krogmeier, D. Bullock, C. Hedges, A. Adewunmi // IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop & 4th IEEE Signal Processing Education Workshop, 2006. P. 162–167.
5. Automated Pothole Detection System / G. D. De Silva, K. M. Thilakarathna, R. S. Perera, C. I. Keppitiyagama, N. M. Laxman, R. Avenue, S. Lanka // in 9th International Information Technology Conference, 2008.
6. SmartRoadSense : Collaborative Road Surface Condition Monitoring / G. Alessandrini, L. C. Klopfenstein, S. Delpriori, M. Dromedari, G. Luchetti, B. D. Paolini, A. Seraghioti, E. Lattanzi, V. Freschi, A. Carini, A. Bogliolo // Ubicomm-2014. 2014. P. 210–215.
7. A Mobile Application for Road Surface Quality Control: UNIquALroad / V. Astarita, M. V. Caruso, G. Danieli, D. C. Festa, V. P. Giofrè, T. Iuele, R. Vaiana // in Procedia - Social and Behavioral Sciences, Proceedings of EWGT2012 - 15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, 2012. Vol. 54. P. 1135–1144.
8. Васильев М. Д., Дегтярев А. В., Чекуров А. Ю. Применение встроенных датчиков смартфонов для обнаружения и анализа нарушений ровности автомобильных дорог // Современные научные технологии. 2022. №12(1). С. 20-25.
9. Radopoulou S.-C., Brilakis I. Improving Road Asset Condition Monitoring // Transp. Res. Procedia. 2016. 14. P. 3004–3012.

10. Nakanishi Y., Kaneta T., Nishino S. A Review of Monitoring Construction Equipment in Support of Construction Project Management // Front. Built Environ. 2022. 7. 632593 p.
11. Khahro S.H., Javed Y., Memon, Z.A. Low-Cost Road Health Monitoring System: A Case of Flexible Pavements // Sustainability. 2021. № 13. 10272 p.
12. Сурин В. И., Волкова З. С. Алгоритм аппроксимации экспериментальных данных на основе низкочастотного фильтра с конечной импульсной характеристикой //Информационные технологии в проектировании и производстве. 2020. №. 4. С. 25-29.
13. Gelper S., Fried R., Croux C. Robust forecasting with exponential and Holt–Winters smoothing // Journal of forecasting. 2010. Vol. 29, №. 3. P. 285-300.
14. Колбас Ю. Ю., Курдыбанская А. И. Применение цифровых фильтров для уменьшения случайной ошибки показаний лазерных гироскопов и маятниковых акселерометров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2018. №2 (119).
15. Джонсон Д., Джонсон Дж., Мур Г. Справочник по активным фильтрам. М.: Энергоатомиздат, 1983. 128 с.
16. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Pub., 2002.
17. Cook J. R., Gourley C. S. A framework for the appropriate use of marginal materials // World road association (PIARC)-technical committee c12 seminar in Mongolia, 2002.
18. Bovik A. C. Handbook of image and video processing. Academic press, 2010.
19. Gonzalez R. C. Digital Image Processing. Pearson Education India, 2009.
20. Bhoraskar R., et al. Wolverine: Traffic and road condition estimation using smartphone sensors //2012 fourth international conference on communication systems and networks (COMSNETS 2012). IEEE, 2012. С. 1-6.
21. Мельник В. Г. Оценка коэффициента экспоненциального сглаживания навигационных данных по результатам измерений // Эксплуатация морского транспорта. 2014. №. 1. С. 29-32.
22. Brown R. G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series. Courier Corporation, 2004.
23. Winters P. R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages // Management science. 1960. Vol. 6, №. 3. P. 324-342.
24. Gelper S., Fried R., Croux C. Robust forecasting with exponential and Holt–Winters smoothing // Journal of forecasting. 2010. Vol. 29, №. 3. P. 285-300.
25. Mitsuishi T. Definition of centroid method as defuzzification //Formalized Mathematics. 2022. Vol. 30, №. 2. P. 125-134.
26. Chakraverty S., et al. Defuzzification // Concepts of soft computing: Fuzzy and ANN with programming, 2019. P. 117-127.

27. Runkler T. A., Glesner M. DECADE—Fast centroid approximation defuzzification for real time fuzzy control applications // Proceedings of the 1994 ACM symposium on Applied computing. 1994. P. 161-165.
28. Wang Y. M. Centroid defuzzification and the maximizing set and minimizing set ranking based on alpha level sets // Computers & Industrial Engineering. 2009. Vol. 57, № 1. P. 228-236.
29. Vlachos M., Kollios G., Gunopoulos D. Discovering similar multidimensional trajectories // Proceedings 18th international conference on data engineering. IEEE, 2002. P. 673-684.
30. Мухаметзянов И. З. Нечеткий логический вывод и нечеткий метод анализа иерархий в системах поддержки принятия решений: приложение к оценке надежности технических систем //Кибернетика и программирование. 2017. №. 2. С. 59-77.
31. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. М.: Радио и связь, 1982. 432 с.
32. Kaufman A., Gupta M. M. Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science. North-Holland, Amsterdam, 1988. 338 p.
33. Gourley C. S. World Road Association (PIARC) - Technical Committee C12 Seminar in Mongolia, June 2002 A Framework for the Appropriate Use of Marginal Materials JR Cook.
34. PIARC – World Road Association. URL: <https://www.piarc.org/en/> (дата обращения: 15.04.2025)
35. Пудова Н. В., Никитин В. В. Анализ значений коэффициента ранговой корреляции Спирмена //Экономический анализ: теория и практика. 2004. №. 3. С. 52-56.
36. Кошелева Н. Н. Корреляционный анализ и его применение для подсчета ранговой корреляции Спирмена // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2012. №. 5. С. 23-26.

References

1. Majidifard H., Jin P., Adu-Gyamfi Y., Buttler W.G. Pavement Image Datasets: A New Benchmark Dataset to Classify and Densify Pavement Distresses. *Transp. Res. Rec.* 2020; (2674): 328–339.
2. Sayers M. W. On the calculation of international roughness index from longitudinal road profile. *Transportation Research Record*. 1995; (1501).
3. Badanis K. Ye. Big Data Technology and Artificial Intelligence in Automobile Traffic Management. In: *XXXVII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya «Sovremennaya nauka: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii» = XXXVII International Scientific and Practical Conference "Modern Science: Current Issues, Achievements and Innovations"*. Penza; 2024. P. 73-77. (In Russ.).

4. Ndoye M., Vanjari S., Huh H., Krogmeier J., Bullock D., Hedges C., Adewunmi A. Sensing and Signal Processing for a Distributed Pavement Monitoring System. *2006 IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop & 4th IEEE Signal Processing Education Workshop*, 2006. P. 162–167.
5. Silva G. D. De, Thilakarathna K. M., Perera R. S., Keppitiyagama C. I., Laxman N. M., Avenue R., Lanka S. Automated Pothole Detection System. In *9th International Information Technology Conference*, 2008.
6. Alessandroni G., L. Klopfenstein C., Delpriori S., Dromedari M., Luchetti G., Paolini B. D., Seraghti A., Lattanzi E., Freschi V., Carini A., Bogliolo A. SmartRoadSense : Collaborative Road Surface Condition Monitoring, *Ubicomm*, 2014. P. 210–215.
7. Astarita V., Caruso M. V., Danieli G., Festa D. C., Giofrè V. P., Iuele T., Vaiana R. A Mobile Application for Road Surface Quality Control: UNIquALroad. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences, Proceedings of EWGT2012 - 15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation*. 2012; 54: 1135–1144.
8. Vasiliev M. D., Degtyarev A. V., Chekurov A. Yu. Application of built-in smartphone sensors for detection and analysis of road unevenness violations. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii = Modern high technologies*. 2022; (12): 20-25. (In Russ.).
9. Radopoulou S.-C., Brilakis I. Improving Road Asset Condition Monitoring. *Transp. Res. Procedia*. 2016; 14: 3004–3012.
10. Nakanishi Y., Kaneta T., Nishino S. A Review of Monitoring Construction Equipment in Support of Construction Project Management. *Front. Built Environ.*. 2022; 7: 632593.
11. Khahro S.H.; Javed Y.; Memon Z.A. Low-Cost Road Health Monitoring System: A Case of Flexible Pavements. *Sustainability*. 2021; (13): 10272.
12. Surin V. I., Volkova Z. S. Algorithm for approximating experimental data based on a low-pass filter with a finite impulse response. *Informatsionnye tekhnologii v proektirovani i proizvodstve = Information technologies in design and production*. 2020; (4): 25-29 (In Russ.).
13. Gelper S., Fried R., Croux C. Robust forecasting with exponential and Holt–Winters smoothing. *Journal of forecasting*. 2010; 29(3): 285-300.
14. Kolbas Yu. Yu., Kurdybanskaya A. I. Application of digital filters to reduce random error in readings of laser gyroscopes and pendulum accelerometers. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Priborostroenie» = Bulletin of Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2018; (2). (In Russ.).
15. Johnson D., Johnson J., Moore G. Handbook of active filters. Moscow: Energoatomizdat; 1983. 128 p. (In Russ.).
16. Smith S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing. California Technical Pub., 2002.

17. Cook J. R., Gourley C. S. A framework for the appropriate use of marginal materials World road association (PIARC)-technical committee c12 seminar in Mongolia, 2002.
18. Bovik A. C. Handbook of image and video processing. Academic press, 2010.
19. Gonzalez R. C. Digital Image Processing. Pearson Education India, 2009.
20. Bhoraskar R., et al. Wolverine: Traffic and road condition estimation using smartphone sensors. 2012 fourth international conference on communication systems and networks (COMSNETS 2012). IEEE, 2012. P. 1-6.
21. Melnik V. G. Estimation of the exponential smoothing coefficient of navigation data based on measurement results. *Ekspluatatsiya morskogo transporta = Operation of sea transport*. 2014; (1): 29-32. (In Russ.).
22. Brown R. G. Smoothing, forecasting and prediction of discrete time series. Courier Corporation, 2004.
23. Winters P. R. Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management science*. 1960; 6 (3): 324-342.
24. Gelper S., Fried R., Croux C. Robust forecasting with exponential and Holt–Winters smoothing. *Journal of forecasting*. 2010; 29(3): 285-300.
25. Mitsuishi T. Definition of centroid method as defuzzification. *Formalized Mathematics*. 2022; 30(2): 125-134.
26. Chakraverty S., et al. Defuzzification. Concepts of soft computing: Fuzzy and ANN with programming, 2019. P. 117-127.
27. Runkler T. A., Glesner M. DECADE—Fast centroid approximation defuzzification for real time fuzzy control applications. Proceedings of the 1994 ACM symposium on Applied computing, 1994. P. 161-165.
28. Wang Y. M. Centroid defuzzification and the maximizing set and minimizing set ranking based on alpha level sets. *Computers & Industrial Engineering*. 2009; 57(1): 228-236.
29. Vlachos M., Kolios G., Gunopoulos D. Discovering similar multidimensional trajectories. In: *Proceedings 18th international conference on data engineering*. IEEE, 2002. P. 673-684.
30. Mukhametzyanov I. Z. Fuzzy logical inference and fuzzy hierarchy process analysis in decision support systems: application to reliability assessment of technical systems. *Kibernetika i programmirovaniye = Cybernetics and programming*. 2017; (2): 59-77. (In Russ.).
31. Kofman A. Introduction to the Theory of Fuzzy Sets. Moscow: Radio i svyaz'; 1982. 432 p. (In Russ.).
32. Kaufman A., Gupta M. M. Fuzzy Mathematical Models in Engineering and Management Science, North-Holland, Amsterdam; 1988. 338 p.
33. Gourley C. S. World Road Association (PIARC) - Technical Committee C12 Seminar in Mongolia, June 2002 A Framework for the Appropriate Use of Marginal Materials JR Cook.

34. PIARC – World Road Association. Available at: <https://www.piarc.org/en/> (accessed 15.04.2025)

35. Pudova N.V., Nikitin V.V. Analysis of the values of the Spearman rank correlation coefficient. *Ekonomicheskii analiz: teoriya i praktika = Economic Analysis: Theory and Practice*. 2004; (3): 52-56. (In Russ.).

36. Kosheleva N. N. Correlation analysis and its application for calculating Spearman's rank correlation. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk = Actual problems of humanitarian and natural sciences*. 2012; (5): 23-26. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the Authors

Баданис Кирилл Евгеньевич, аспирант,
кафедра Информационных и робототехнических
систем, Белгородский государственный
национальный исследовательский университет,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: badanis@bsuedu.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7460-2843>,
SPIN-код: 5224-0012

Фирсов Никита Юрьевич, аспирант,
кафедра Информационных и робототехнических
систем, Белгородский государственный нацио-
нальный исследовательский университет,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: 1331431@bsuedu.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-6235-3055>

Шамраев Анатолий Анатольевич, кандидат
технических наук, доцент, кафедра
Информационных и робототехнических систем,
Белгородский государственный национальный
исследовательский университет,
г. Белгород, Российская Федерация,
e-mail: shamraev@bsuedu.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3799-1373>,
Scopus: 55902510400,
Researcher ID: V-3349-2017,
SPIN-код: 1943-7837

Kirill Ye. Badanis, Post-Graduate Student,
Department of Information and Robotic Systems,
Belgorod State National Research University,
Belgorod, Russian Federation,
e-mail: badanis@bsuedu.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7460-2843>,
SPIN-code: 5224-0012

Nikita Yu. Firsov, Post-Graduate Student,
Department of Information and Robotic Systems,
Belgorod State National Research University,
Belgorod, Russian Federation,
e-mail: 1331431@bsuedu.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0009-0003-6235-3055>

Anatoly A. Shamraev, Cand. of Sci.
(Engineering), Associate Professor, Department
of Information and Robotic Systems, Belgorod
State National Research University,
Belgorod, Russian Federation,
e-mail: shamraev@bsuedu.ru,
ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3799-1373>,
Scopus: 55902510400,
Researcher ID: V-3349-2017,
SPIN-code: 1943-7837