

СМАРТФОННИЙ МОНІТОРИНГ СТАНУ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИВУ

SMARTPHONE-BASED MONITORING OF ROAD PAVEMENT CONDITION



Зарічний Антон Олександрович, аспірант кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: antohazarich@gmail.com, тел. +380442803942

<https://orcid.org/0009-0004-5723-3443>



Усиченко Олена Юрївна, кандидат технічних наук, доцент, в.о.завідувача кафедри транспортного будівництва та управління майном, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: fbk@ukr.net, тел. +380442803942

<https://orcid.org/0000-0002-7482-8420>

Анотація. Доведено актуальність створення сучасних підходів до моніторингу стану дорожнього покриття в умовах України, де значна частина автомобільних шляхів перебуває у незадовільному стані, а традиційні методи діагностики відзначаються високою вартістю та обмеженою масштабованістю. У результаті проведеного дослідження досягнуто мети щодо розроблення концепції системи смартфонного моніторингу дорожнього полотна, яка базується на використанні вбудованих сенсорів мобільних пристроїв (акселерометра, гіроскопа, GPS) для збору та аналізу телеметричних даних у режимі реального часу. Для досягнення поставленої мети вирішено низку завдань: здійснено огляд сучасних методів оцінки дорожнього покриття; окреслено технічні аспекти реалізації збору, фільтрації та попередньої обробки сенсорних даних; визначено ключові метрики, що характеризують якість дорожнього покриття, зокрема середньоквадратичне прискорення (*RMSA*), пікові значення та спектральні характеристики сигналу; сформовано архітектуру програмного забезпечення, яке забезпечує сегментацію маршруту, класифікацію ділянок дороги та візуалізацію результатів у форматі інтерактивних карт.

Запропоновано сучасній інструментарій смартфонного моніторингу, який поєднує алгоритми математичної статистики, фільтрації сигналів та методи машинного навчання, що дозволяє виявляти вибоїни, хвилеподібність та інші характерні дефекти дорожнього покриття. У ході експериментальної апробації прототипу мобільного застосунку було підтверджено технічну можливість збору та збереження даних у форматі CSV, їх подальшої обробки у Python із застосуванням бібліотек pandas, numpy, scipy, matplotlib та folium, а також побудови картографічних моделей у вигляді GeoJSON та HTML-мап. Отримані результати свідчать про здатність системи фіксувати відмінності між ділянками дороги різної якості: для рівних відрізків значення *RMSA* становило 0.3–1.5 м/с², тоді як для пошкоджених сегментів воно сягало понад 4 м/с². Це підтверджує чутливість та інформативність запропонованого підходу.

Наукова новизна роботи полягає у поєднанні методів сенсорного моніторингу з концепціями краудсорсингу, що відкриває можливості для масштабного збору даних про стан доріг без залучення дороговартісного обладнання. Практична цінність розробки визначається економічною доцільністю використання смартфонів як вимірювальних пристроїв, можливістю інтеграції системи у цифрові

платформи для транспорту та міської інфраструктури, а також перспективою створення громадських сервісів для моніторингу якості доріг у режимі реального часу.

У результаті дослідження сформовано науково-методичне підґрунтя для подальшої розробки програмного забезпечення, здатного забезпечувати автоматичне виявлення небезпечних ділянок дороги та формування звітів для дорожніх служб. Подальші напрями дослідження пов'язані з удосконаленням алгоритмів нормалізації даних з урахуванням типу транспортного засобу, швидкісного режиму та положення смартфона, а також з інтеграцією моделей машинного навчання (XGBoost, RandomForest, CNN) для підвищення точності класифікації дефектів дорожнього полотна.

Ключові слова: дефекти дорожнього покриття; експлуатаційний стан автомобільних доріг; моніторинг якості дороги; смартфонні технології; оцінка транспортно-експлуатаційного стану дороги; цифрові карти доріг; мобільні системи діагностики стану доріг.

Вступ. Якість дорожнього покриття є одним із ключових чинників, що визначає безпеку руху транспортних засобів, збереження їхньої технічної справності, комфорт пасажирів та економічну ефективність перевезень. У сучасних умовах України питання забезпечення належного стану автомобільних доріг набуває особливої актуальності, адже у багатьох регіонах спостерігається хронічне недофінансування ремонтних робіт, а значна частина дорожньої мережі перебуває у незадовільному чи навіть аварійному стані. Такі тенденції зумовлюють не лише зростання транспортних витрат, але й підвищення рівня аварійності, що негативно впливає на соціально-економічний розвиток держави.

Поряд із цим, традиційні методи обстеження дорожнього полотна, серед яких лазерне профілювання, вимірювання міжнародного індексу нерівності (IRI) або візуальні інспекції, характеризуються високою вартістю, потребою у використанні спеціалізованого обладнання та залученні кваліфікованого персоналу. Крім того, такі методи реалізуються переважно нерегулярно, що суттєво знижує оперативність прийняття управлінських рішень і не дозволяє своєчасно виявляти проблемні ділянки дорожньої мережі. Це створює ситуацію, за якої дорожні служби часто діють реактивно, реагуючи лише на скарги мешканців або наслідки аварій, замість здійснення системного і превентивного контролю.

Враховуючи викладене, особливого значення набуває пошук нових інструментів моніторингу, здатних забезпечити більшу доступність, масштабованість і оперативність збору даних про стан дорожнього покриття. Останні роки засвідчують зростання уваги до інноваційних підходів, серед яких перспективним напрямом є застосування вбудованих сенсорів сучасних смартфонів – акселерометрів, гіроскопів, GPS-модулів. Такі пристрої здатні фіксувати коливання транспортного засобу та просторові координати, що відкриває можливості для ідентифікації вибоїн, тріщин, хвилеподібності та інших дефектів дорожнього полотна у режимі реального часу.

Використання смартфонів для збору дорожньої інформації має низку суттєвих переваг. По-перше, воно не потребує придбання дорогих дорожніх лабораторій та спеціалізованих вимірювальних комплексів. По-друге, така система є масштабованою та здатна охоплювати значні території завдяки залученню звичайних користувачів доріг у межах краудсорсингових платформ. По-третє, цифровізація транспортної галузі та розвиток інформаційно-комунікаційних технологій створюють сприятливі умови для інтеграції подібних рішень у міські транспортні системи та платформи «розумного міста».

Отже, формування сучасної системи смартфонного моніторингу дорожнього покриття є актуальним і своєчасним завданням, яке відповідає глобальним тенденціям цифровізації транспортної інфраструктури та розвитку інтелектуальних транспортних систем. Результати дослідження у цьому напрямі здатні зробити вагомий внесок у підвищення ефективності управління дорожнім господарством, зменшення витрат на експлуатацію транспортних засобів та підвищення рівня безпеки дорожнього руху.

Матеріали та методи. У дослідженні застосовано методи аналізу та узагальнення наукових праць, систематизацію сучасних підходів до моніторингу стану дорожнього полотна, а також елементи

математичного моделювання. Це дозволило обґрунтувати використання сенсорних систем у поєднанні з цифровими технологіями для оцінювання якості доріг.

Метою дослідження є аналіз і порівняння існуючих методів оцінювання стану дорожнього покриття з виокремленням їхніх переваг і обмежень, що формує науково-практичне підґрунтя для створення інноваційних програмних рішень на базі мобільних пристроїв.

Огляд наукових розробок. У світовій практиці виділяють три основні групи методів: традиційні, супутникові та інноваційні сенсорні системи на основі смартфонів [1–5].

Традиційні методи домінують у більшості країн, зокрема й в Україні. Вони базуються на використанні спеціалізованої техніки й вважаються «золотим стандартом» завдяки високій точності вимірювань. Серед них найбільш поширеними є чотири підходи. Лазерне профілювання (Class I) передбачає встановлення лазерних датчиків на транспортний засіб для детального вимірювання профілю дороги; результати дають змогу обчислювати міжнародний індекс нерівності (IRI), що відображає ступінь шорсткості покриття. Інерційні системи (Class II) використовують акселерометри та гіроскопи, встановлені на кузові автомобіля, для визначення параметрів рівності поверхні. Інтегратор вибоїн, або Bump Integrator (Class III), реєструє сумарну амплітуду коливань підвіски транспортного засобу під час руху ділянкою, що робить його дешевшим, але водночас менш точним. Нарешті, візуальні інспекції (Class IV) базуються на експертній оцінці стану дороги за шкалою від 0 до 5, найчастіше використовуються для планування поточного ремонту, проте мають високий рівень суб'єктивності. Попри свою точність, традиційні методи характеризуються низкою суттєвих обмежень: надзвичайно високою вартістю обладнання, необхідністю залучення висококваліфікованого персоналу, складністю обробки результатів та низькою періодичністю проведення обстежень, яка зазвичай обмежується одним разом на рік [2]. Тому вони застосовуються переважно у випадках нормативних досліджень для формування бюджетів, під час аудиту якості нових доріг чи в межах об'єктів капітального будівництва.

Окрему групу складають супутникові методи, які розвиваються завдяки появі відкритих даних та удосконаленню алгоритмів комп'ютерного зору. Вони дозволяють отримувати широке географічне охоплення та здійснювати ретроспективний аналіз за архівними знімками. Наприклад, система Sentinel-2 забезпечує оновлення даних кожні п'ять днів, що створює передумови для регулярного моніторингу. Перевагами такого підходу є відсутність потреби у спеціалізованих виїзних обстеженнях та можливість інтеграції супутніх табличних даних, зокрема про кліматичні чи географічні умови. У дослідженні Cadamuro et al. [3] досягнуто понад 70 % точності при класифікації доріг за п'ятьма класами якості, а у роботі Oshri et al. [4] було реалізовано подібний підхід для оцінки інфраструктури в Африці. Проте супутникові методи мають і значні обмеження: просторове розділення 10–30 м не дозволяє детально ідентифікувати локальні дефекти дорожнього полотна, формування достовірних навчальних вибірок потребує поєднання з даними наземних вимірювань, а реалізація складних моделей вимагає потужних обчислювальних ресурсів та використання спеціалізованого програмного забезпечення, зокрема Earth Engine API [5]. Унаслідок цього супутниковий підхід частіше використовується як допоміжний інструмент для попереднього визначення пріоритетних ділянок, що потребують детальнішого дослідження.

Найбільш перспективним напрямом сьогодні вважається використання сенсорів сучасних смартфонів, які дозволяють організувати масштабований і дешевий моніторинг дорожнього покриття. Завдяки акселерометрам можна фіксувати вертикальні коливання, що відображають рівність дороги, гіроскоп забезпечує можливість коригування впливу положення пристрою, а GPS-модуль дозволяє точно визначати координати дефектів. Частота вибірки у межах 50–100 Гц забезпечує достатню точність для реєстрації навіть дрібних пошкоджень. У світі вже реалізовано кілька відомих застосунків: Roadroid, який збирає дані акселерометра і формує умовний індекс якості дороги [6]; TotalPave, що поєднує сенсорні вимірювання з візуальними інспекціями; RoadBotics, який використовує відеоаналіз із застосуванням нейронних мереж для автоматичного виявлення тріщин і вибоїн [7].

Застосування смартфонів як засобу моніторингу відкриває нові можливості для створення краудсорсингових платформ. Масове залучення користувачів дає змогу формувати великі масиви

геоприв'язаних даних, які можна використовувати як у наукових цілях, так і для підтримки прийняття управлінських рішень дорожніми службами. Попри це, такі системи мають певні обмеження. Вимірювання залежать від положення смартфона в автомобілі, типу підвіски транспортного засобу та стилю водіння. Дані потребують попередньої фільтрації шумів і відсікання хибних показників. Водночас навіть із цими викликами смартфонний моніторинг залишається одним із найбільш перспективних напрямів розвитку систем контролю стану дорожнього покриття, особливо у країнах з обмеженим фінансуванням дорожньої інфраструктури [6–7].

Виклад основного матеріалу. Формування сучасних інструментів смартфонного моніторингу дорожнього покриття базується на аналізі проблем дорожньої мережі України та розробці програмного забезпечення, здатного забезпечувати оперативне виявлення дефектів у режимі реального часу. Автомобільні дороги в багатьох регіонах перебувають у незадовільному стані, що проявляється у вигляді поздовжніх і поперечних тріщин, осідань, хвилеподібності покриття, локальних вибоїн, розшарувань конструкції дорожнього одягу, деформацій у вигляді колійності, а також пошкоджень узбіч і дренажних систем. Наявність таких дефектів негативно впливає на безпеку руху та підвищує ризик аварійних ситуацій. Водночас існуюча система моніторингу в Україні здебільшого залишається реактивною: дорожні служби зазвичай реагують на скарги мешканців або наслідки аварій, не маючи інструментів для превентивного діагностування.

Запропонована система смартфонного моніторингу дорожнього покриття базується на послідовній обробці сигналів від сенсорів мобільного пристрою. Логіка роботи складається з декількох основних етапів, що забезпечують перехід від збору даних до їх візуалізації на карті.

На першому етапі відбувається збір даних із сенсорів смартфона. Акселерометр реєструє прискорення вздовж трьох осей (X, Y, Z), причому для оцінки якості дорожнього покриття найбільш інформативною є вертикальна вісь (Z). Гіроскоп забезпечує інформацію про кутове положення пристрою та дозволяє відфільтровувати похибки, викликані нахилами чи поворотами смартфона. GPS-модуль визначає геолокацію з похибкою до 2–5 м та фіксує швидкість руху транспортного засобу. За потреби до складу системи можуть бути інтегровані додаткові сенсори, такі як барометр чи магнітометр [10].

Другим етапом є фільтрація сигналу та попередня обробка. Сирі дані акселерометра містять значні шумові складові, що виникають через вібрації автомобіля, характеристики підвіски та положення смартфона. Тому перед подальшим аналізом застосовуються алгоритми згладжування. Серед них особливе місце посідає фільтр Савіцького–Голя, який забезпечує згладжування сигналу без суттєвих втрат амплітуди піків:

$$\hat{y}_i = \sum_{j=-k}^k c_j * x_{i+j} \quad (1)$$

де c_j – коефіцієнти фільтра;
 x_{i+j} – значення сигналу.

Іншим поширеним підходом є метод рухомого середнього, що забезпечує просту та надійну обробку:

$$\bar{x}_t = \frac{1}{N} * \sum_{i=t-N+1}^t x_i \quad (2)$$

де N – кількість точок у вікні усереднення;
 x_i – значення сигналу у момент часу i .

Після фільтрації додатково здійснюється відсікання аномалій, зокрема відрізків з нульовою швидкістю або некоректним положенням пристрою.

На наступному етапі виконується обчислення метричних характеристик сигналу. Основним показником є середньоквадратична амплітуда прискорення (*RMSA*), яка використовується як базова метрика у міжнародній практиці оцінювання стану доріг [8–9]:

$$RMSA = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N a_{z,i}^2} \quad (3)$$

де $a_{z,i}$ – вертикальне прискорення у момент i ;
 N – кількість відліків сигналу.

Додатково використовуються й інші характеристики: Peak-to-Peak Amplitude (P2P), що визначає різницю між максимальним і мінімальним значенням сигналу, а також спектральний аналіз (FFT), який дозволяє виявляти періодичні коливання, характерні для хвилеподібності чи колійності [11]. Для виявлення імпульсних аномалій (наприклад, вибоїн) застосовуються алгоритми пошуку піків, зокрема `find_peaks` з бібліотеки `scipy.signal` [13].



Рисунок 1 – Архітектура та послідовність роботи програмного забезпечення

Figure 1 – Architecture and sequence of software operation

Подальший етап передбачає сегментацію маршруту та класифікацію стану дороги. Траса ділиться на ділянки фіксованої довжини (наприклад, 20 м), для кожної з яких розраховується індекс якості. Залежно від нормалізованих значень *RMSA* сегменти відносять до категорій: добра дорога (<0,5), задовільна (0,5–1,0), незадовільна (1,0–2,0) або аварійна (>2,0). Для більшої точності можуть застосовуватись алгоритми машинного навчання, зокрема RandomForest, XGBoost або згорткові нейронні мережі [12].

Результати аналізу зберігаються у базі даних або локальних файлах (CSV, GeoJSON), що дає змогу формувати звіти та інтерактивні карти. Для візуалізації застосовуються бібліотеки Folium, Leaflet чи Mapbox, де сегменти дороги відображаються кольоровою шкалою: зелений відповідає доброму стану, помаранчевий — незадовільному, червоний — аварійному. Така карта може бути використана як інженерними підрозділами дорожніх служб, так і громадськими ініціативами [10].

У таблиці 1 наведено технічне наповнення основних блоків системи та приклади інструментів для їхньої реалізації.

Таблиця 1 – Технічні інструменти для реалізації компонентів системи
Table 1 – Technical tools for implementing system components

Блок	Технічне наповнення	Приклади бібліотек
Збір даних	sensorManager в Android / iOS SDK	Android API, React Native Sensors
Фільтрація	Згладжування сигналу	scipy.signal.savgol_filter, pandas.rolling
Обчислення RMSA	$\text{mean}(z2)\sqrt{\text{mean}(z^2)}$	numpy, math
Виявлення піків	Пошук імпульсів у сигналі	scipy.signal.find_peaks, statsmodels
Класифікація	Порогові правила / ML	sklearn, keras, xgboost
Збереження даних	CSV, SQLite, GeoJSON	pandas, sqlite3, geopandas
Візуалізація	Інтерактивні карти	folium, plotly, leaflet.js

Для підтвердження технічної можливості збору даних сенсорів смартфона було розроблено простий прототип Android-додатку. Основним завданням стала демонстрація збору телеметричних даних з акселерометра, гіроскопа та GPS-модуля з подальшим збереженням їх у форматі CSV для аналізу в середовищі Python.

Інтерфейс додатку є мінімалістичним і включає лише дві основні функції: запуск і завершення запису даних (рис. 2). Після активації запису додаток реєструє тривимірні компоненти прискорення, кутові швидкості та координати руху транспортного засобу. Для цього використовується стандартний інструментарій Android – SensorManager для акселерометра і гіроскопа та LocationManager для визначення географічних координат. Усі зібрані дані записуються у CSV-файл построчно з використанням таких полів:

$$Time, Type, X, Y, Z, Latitude, Longitude \quad (4)$$

де *Time* – часовий штамп у мілісекундах;

Type – тип сенсора (Accelerometer або Gyroscope);

X, Y, Z – компоненти прискорення чи кутової швидкості по відповідних осях;

Latitude, Longitude – координати у градусах.

Таким чином формується база вимірювань, яка надалі може бути оброблена у Python із використанням бібліотек pandas, numpy, scipy та matplotlib. Це забезпечує можливість реалізації алгоритмів фільтрації, обчислення метрик (RMSA, P2P, FFT) та побудови картографічних моделей [9–11].

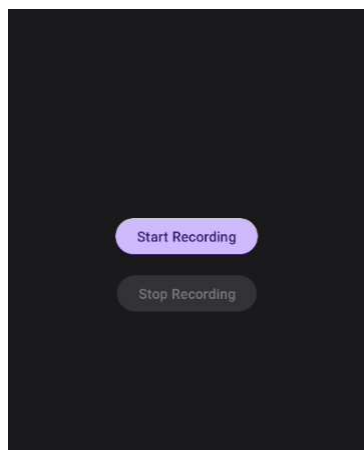


Рисунок 2 – Прототип android-додатку для запису сенсорних даних
Figure 2 – Prototype of the Android application for sensor data recording

Для забезпечення безпеки роботи додатку у файл AndroidManifest.xml додано відповідні дозволи на роботу із сенсорами та геолокацією, а система динамічно запитує підтвердження від користувача. Після компіляції створено інсталяційний APK-файл, що дозволяє розгорнути прототип на інших пристроях без використання Android Studio.

Після створення прототипу мобільного застосунку (див. підрозділ 3.6.1) було проведено тестування збору сенсорної інформації під час руху пішки та в автомобілі. Застосунок отримує дані з трьох основних джерел: акселерометра, гіроскопа та GPS-модуля.

Акселерометр вимірює прискорення по осях XXX, YYY, ZZZ та є ключовим сенсором для виявлення нерівностей дорожнього покриття. Гіроскоп фіксує кутові швидкості, що дозволяє враховувати вплив нахилів або поворотів пристрою. GPS-модуль визначає широту, довготу та швидкість переміщення транспортного засобу, забезпечуючи геоприв'язку даних [10–11]. Приклад сирих даних наведено на рисунку 3.

```
Time,Type,X,Y,Z,Latitude,Longitude
1753796015011,Accelerometer,-3.7890346,7.984849,3.2075787,,
1753796015018,Gyroscope,-0.53068876,-2.369697,-0.35475972,,
1753796015022,Accelerometer,-3.5102708,7.668997,4.930411,,
1753796015031,Gyroscope,-0.735023,-2.7823362,-0.3346012,,
1753796015041,Accelerometer,-1.544567,6.6711893,5.389833,,
1753796015051,Gyroscope,-0.95218545,-3.1476336,-0.41706792,,
1753796015061,Accelerometer,0.34456646,8.46102,8.047063,,
1753796015070,Gyroscope,-1.0575596,-1.9646939,-0.9149227,,
1753796015080,Accelerometer,0.046660043,9.930214,10.152746,,
1753796015088,Gyroscope,-1.0056361,-1.5380048,-1.2542582,,
1753796015099,Accelerometer,-0.32542387,7.2849483,6.6628146,,
1753796015108,Gyroscope,-1.1772891,-1.198364,-1.2826633,,
1753796015119,Accelerometer,-0.9882358,5.3336015,6.094519,,
1753796015128,Gyroscope,-1.2292126,-0.6317869,-1.3064871,,
1753796015139,Accelerometer,-1.6917256,4.892126,5.029713,,
1753796015147,Gyroscope,-1.4411827,-0.3990474,-0.961043,,
1753796015158,Accelerometer,-1.9393828,4.3932223,4.2687955,,
1753796015167,Gyroscope,-1.7340924,-0.51327914,-0.4561633,,
1753796015176,Accelerometer,-2.1260228,4.9256253,3.4241292,,
1753796015186,Gyroscope,-1.9460624,-1.3712387,-0.32574365,,
1753796015196,Accelerometer,-1.2059826,6.259624,4.476971,
```

Рисунок 3 – Приклад сирого csv-файлу з даними сенсорів
Figure 3 – Example of a raw CSV file with sensor data

Первинна обробка та візуалізація даних. Зібрані мобільним застосунком дані акселерометра, гіроскопа та GPS зберігаються у форматі CSV та можуть бути оброблені у Python з використанням бібліотек pandas, numpy, scipy та matplotlib. Первинна обробка включає імпорт даних, переведення часових міток у формат дати й часу з урахуванням часової зони, а також фільтрацію відсутніх або некоректних записів.

Дані акселерометра та гіроскопа структуруються у вигляді окремих колонок для кожної осі. Це дозволяє побудувати часові графіки вертикального прискорення та кутової швидкості, що демонструють характерні коливання транспортного засобу під час руху. Водночас дані GPS використовуються для візуалізації маршруту у вигляді треку на карті, що дозволяє зіставити характеристики вібрацій із конкретними ділянками дороги.

Для додаткового аналізу будуються графіки середньоквадратичного прискорення (*RMSA*), які дозволяють кількісно оцінити рівень нерівності, а також графіки піків прискорення, що ідентифікують локальні удари (наприклад, при проїзді ям). Завершальним етапом є побудова сегментованої карти дорожнього полотна, де кожен відрізок траси отримує власний індекс якості. Візуалізація реалізується у вигляді інтерактивної карти з градацією кольорів від зеленого (добрий стан) до червоного (аварійний) [8–13].

Обчислення метрик дорожнього покриття. Для кількісної оцінки стану дороги застосовуються кілька ключових метрик. Основною є середньоквадратична амплітуда прискорення (*RMSA*), яка добре зарекомендувала себе як універсальний показник рівності покриття та корелює з міжнародним індексом нерівності (*IRI*) [8–9].

Додатково використовується Peak-to-Peak Amplitude (*P2P*), що характеризує різницю між найбільшим і найменшим значенням сигналу, а також спектральний аналіз (*FFT*), який дозволяє виявляти періодичні коливання, пов'язані з хвилеподібністю або колійністю покриття [11]. Для автоматичного виявлення вибоїв застосовується алгоритм пошуку піків (*find_peaks* з пакету *scipy.signal*) [13].

Сегментація траси на відрізки довжиною 20–50 м дозволяє прив'язати розраховані метрики до конкретних ділянок дороги. Це створює основу для подальшої класифікації їхнього стану (добрий, задовільний, незадовільний, аварійний) і формування інтерактивних карт для практичного використання дорожніми службами та органами місцевого самоврядування [10,12].

Обчислення метрик дорожнього покриття. Для кількісної оцінки стану дорожнього полотна на основі сенсорних даних зі смартфона застосовується низка метричних характеристик. Вони дозволяють виявляти як локальні дефекти (вибоїни, шви), так і регулярні аномалії (хвилеподібність, колійність).

Найбільш поширеною є метрика середньоквадратичного прискорення (*RMSA*, Root Mean Square Acceleration), яка широко використовується у дорожньо-транспортних дослідженнях [14,15]. Вона визначається як:

$$RMSA = \sqrt{\frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N a_z^2(i)} \quad (5)$$

де $a_z(i)$ – миттєве прискорення по вертикальній осі Z ;

N – кількість вимірів у вікні.

Зростання значення *RMSA* свідчить про нерівність покриття, наявність хвиль або локальних пошкоджень.

Іншим показником є **виявлення піків прискорення**. Пікові значення сигналу зазвичай відповідають короткочасним ударам колеса об нерівність (яма, люк, стиковий шов). Для їх визначення застосовуються алгоритми локального пошуку максимумів, наприклад *scipy.signal.find_peaks* [16].

Додатковим інструментом є **аналіз спектральних характеристик** сигналу. Застосування швидкого перетворення Фур'є (*FFT*) дозволяє виявляти періодичні дефекти дорожнього полотна

(регулярні хвилі, поперечні стики тощо). Попри необхідність стабільної частоти дискретизації, спектральні методи можуть суттєво підвищити точність класифікації доріг [17].

Після обчислення локальних значень *RMSA* виконується **сегментація маршруту** на відрізки фіксованої довжини (наприклад, 50 м або 5 с), що дозволяє просторово прив'язати метрики до конкретних координат GPS. Це створює основу для побудови інтерактивних карт якості покриття з кольоровою візуалізацією стану дорожніх сегментів.

Таким чином, поєднання *RMSA*, пікових значень прискорення та спектральних характеристик формує надійний набір показників, придатний для подальшої машинної класифікації та інтеграції у краудсорсингові системи моніторингу доріг [14–17].

```
def compute_rmsa(df, accel_z_series, window_size=10):
    df['accel_z_filtered'] = savgol_filter(accel_z_series.interpolate(), window_length=11, polyorder=2)
    z = df['accel_z_filtered'].fillna(0)
    z = z - z.mean()

    smoothed = z.rolling(window=window_size, center=True).median()
    rmsa = smoothed.rolling(window=window_size, center=True).apply(lambda x: np.sqrt(np.mean(x**2)))

    return rmsa

def detect_peaks(accel_z_series, threshold):
    return find_peaks(accel_z_series.fillna(0), height=threshold)

def segment_data(df, rmsa, segment_length=30):
    df['segment'] = (np.arange(len(df)) // segment_length).astype(int)
    segments = []
    for segment_id, group in df.groupby('segment'):
        gps_only = group[group['Type'] == 'Location']
        avg_lat = gps_only['Latitude'].mean() if not gps_only.empty else None
        avg_lon = gps_only['Longitude'].mean() if not gps_only.empty else None
        segment_rmsa = rmsa.loc[group.index].dropna()
        avg_rmsa = segment_rmsa.mean() if not segment_rmsa.empty else None

        segments.append({
            "segment": segment_id,
            "avg_latitude": avg_lat,
            "avg_longitude": avg_lon,
            "avg_rmsa": avg_rmsa
        })

    return pd.DataFrame(segments).dropna(subset=["avg_latitude", "avg_longitude"])
```

Рисунок 4 – Схема обчислення основних метрик з даних сенсорів
Figure 4 – Scheme of calculating key metrics from sensor data

Візуалізація результатів аналізу дорожнього покриття. На завершальному етапі обробки дані з сенсорів смартфона та просторові координати візуалізуються у вигляді графіків і карт, що забезпечує зручність інтерпретації та використання результатів.

Основним інструментом є побудова інтерактивної HTML-мапи з градацією стану дорожнього покриття, де кожен сегмент дороги відображається кольором відповідно до середнього значення *RMSA*:

- червоний – аварійний або незадовільний стан (високе *RMSA*),
- жовтий / оранжевий – задовільний стан,
- зелений – добрий стан (низьке *RMSA*).

Візуалізація реалізована з використанням бібліотеки *Folium*, яка забезпечує інтерактивність карти: можливість масштабування, переміщення та збереження результатів у форматі *.html* (рис. 5). Це дозволяє дорожнім службам швидко ідентифікувати критичні ділянки, а також використовувати дані для планування ремонтів.

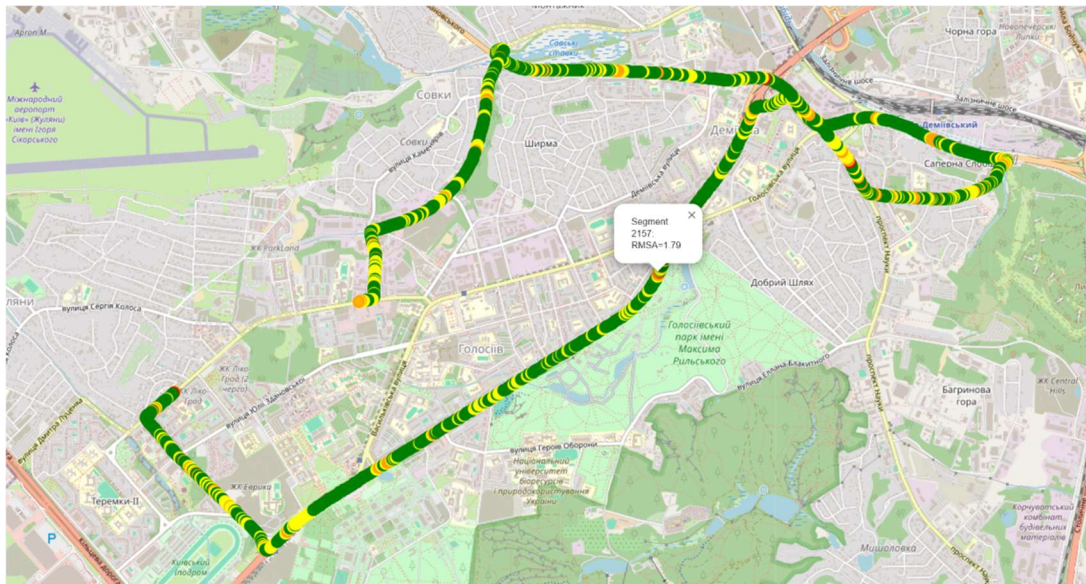


Рисунок 5 – Інтерактивна карта сегментів дороги з індексами *RMSA*
Figure 5 – Interactive road segment map with *RMSA* indices

Крім інтерактивної карти, у процесі дослідження було побудовано низку додаткових графіків, які ілюструють характеристики сигналів сенсорів. Зокрема, часові графіки прискорень по осях акселерометра (рис. 6) дають змогу простежити динаміку вібрацій під час руху, тоді як графіки кутових швидкостей гіроскопа (рис. 7) відображають зміни орієнтації смартфона та коливання транспортного засобу. Важливим елементом аналізу є виявлені піки прискорення, що відзначаються на графіках як маркери ударів, пов'язаних з проїздом через ями чи нерівності (рис. 8). Додатково формується графік середньоквадратичного прискорення *RMSA* (рис. 9), який відображає зміну інтегральної характеристики шорсткості дорожнього покриття в часі.

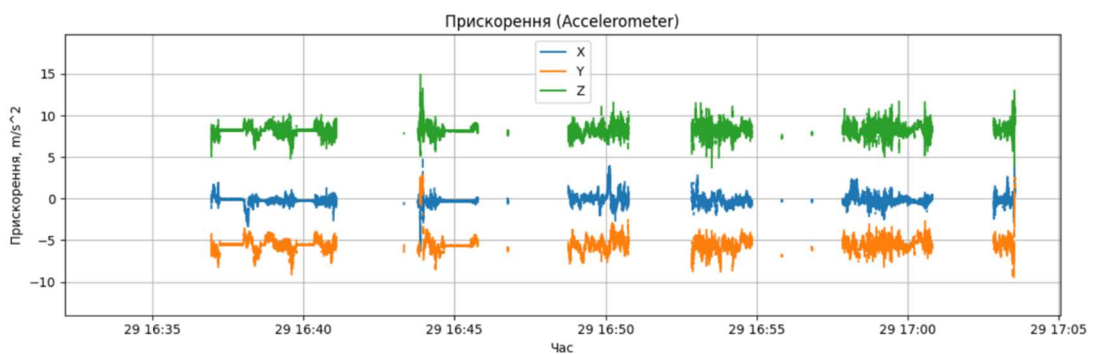


Рисунок 6 – Графік прискорень за даними акселерометра
Figure 6 – Acceleration graph based on accelerometer data

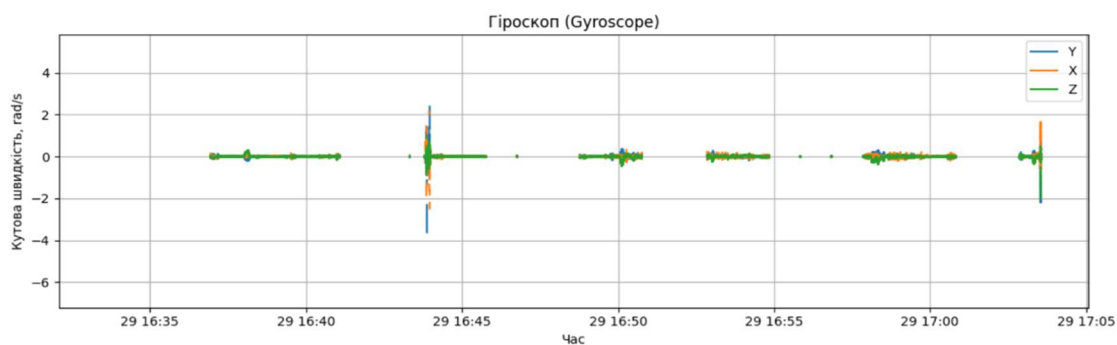


Рисунок 7 – Графік кутових швидкостей за даними гіроскопа
Figure 7 – Angular velocity graph based on gyroscope data

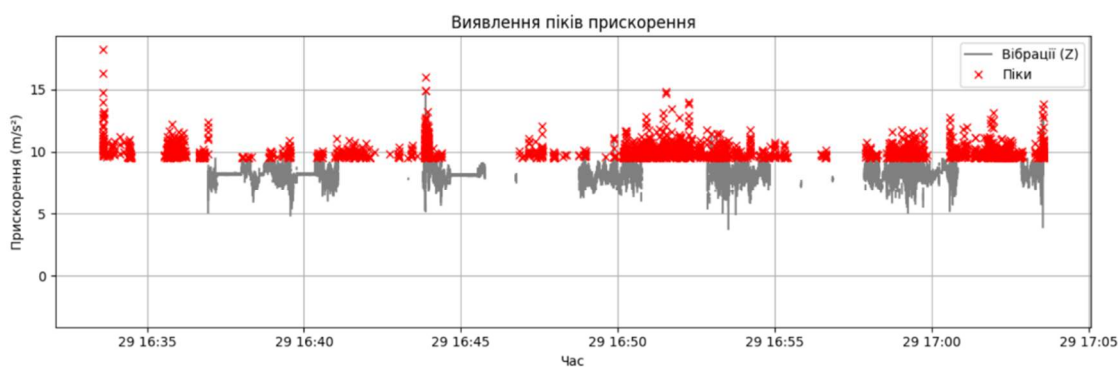


Рисунок 8 – Виявлення піків прискорення (характерні удари)
Figure 8 – Detection of acceleration peaks (characteristic impacts)



Рисунок 9 – Динаміка *RMSA* під час руху
Figure 9 – *RMSA* dynamics during movement

Окрім візуальних графіків, створюється таблиця сегментів із середніми координатами та значеннями *RMSA* (рис. 10). Вона може експортуватися у форматах *.csv* та *.geojson*, що забезпечує сумісність із сучасними геоінформаційними системами, такими як QGIS чи Mapbox, і дозволяє здійснювати подальший просторовий аналіз.

```

segment, avg_latitude, avg_longitude, avg_rmsa
1, 50.38692857, 30.45877463, 1.1905873123901394
4, 50.38687069, 30.45866784, 3.1042196801862114
8, 50.38680712, 30.45857982, 0.434899913159301
11, 50.38675842, 30.45847563, 0.299098690431593
15, 50.38670193, 30.45837965, 0.07750715860418164
18, 50.38664624, 30.45828266, 0.41435967208762053
22, 50.38658843, 30.45818355, 0.25355585908477557
25, 50.38653159, 30.45807609, 0.09224395778115105
29, 50.386473, 30.45797032, 0.7931575521074586
    
```

Рисунок 10 – Таблиця сегментів із координатами та середніми значеннями *RMSA*
Figure 10 – Table of segments with coordinates and average *RMSA* values

Застосування візуалізації у цьому контексті має особливе значення. Вона дозволяє оперативно виявляти пріоритетні ділянки дороги, що потребують ремонту, а також створює можливість історичного порівняння стану дорожнього покриття при повторних обстеженнях.

Крім того, результати у вигляді карт та графіків можуть бути використані для підготовки зручних і наочних звітів для муніципальних органів влади та громадських ініціатив. Таким чином, візуалізація відіграє роль містка між числовими даними та реальними дорожніми умовами, роблячи результати придатними для практичного застосування [14–17].

Висновки. У дослідженні застосовано методи аналізу та узагальнення наукових праць, систематизацію сучасних підходів до моніторингу стану дорожнього полотна, а також елементи математичного моделювання. Це дозволило обґрунтувати використання сенсорних систем у поєднанні з цифровими технологіями для оцінювання якості доріг. Метою дослідження було проаналізувати та порівняти існуючі методи контролю дорожнього покриття з виокремленням їхніх переваг і обмежень, що формує науково-практичне підґрунтя для створення інноваційних програмних рішень на базі мобільних пристроїв.

У ході огляду наукових розробок було визначено три основні групи методів: традиційні, супутникові та інноваційні сенсорні системи на основі смартфонів [1–7]. Традиційні методи (лазерне профілювання, інерційні системи, інтегратори вибоїн, візуальні огляди) відзначаються високою точністю, але потребують дороговартісного обладнання, спеціалізованого персоналу та здійснюються з низькою періодичністю. Супутникові підходи відкривають широке географічне охоплення й можливість ретроспективного аналізу, проте обмежені просторовою роздільністю знімків і потребою в потужних обчислювальних ресурсах [3–5]. Найбільш перспективним напрямом визнано смартфонний моніторинг, який забезпечує масштабованість, низьку вартість і можливість створення краудсорсингових систем, що дозволяють залучати велику кількість користувачів до збору геоприв'язаних даних [6–7]. Попри залежність результатів від типу автомобіля, положення телефону й стилю водіння, цей підхід залишається одним із найбільш практичних для країн з обмеженим фінансуванням дорожньої інфраструктури.

Розроблений прототип системи оцінювання стану дорожнього покриття на основі сенсорних даних смартфона дав змогу здійснити первинну апробацію концепції пасивного моніторингу. У процесі випробувань були зібрані дані акселерометра, гіроскопа та GPS у реальних умовах руху легкового автомобіля. Обробка часових рядів дозволила здійснити фільтрацію шумів, виявити піки прискорення та обчислити середньоквадратичне прискорення (*RMSA*), а також пов'язати просторові координати з вібраційним навантаженням. У середньому значення *RMSA* становили 0,3–1,5 м/с², що свідчить про задовільний стан дорожнього полотна, проте на окремих сегментах показник перевищував 4 м/с², що вказує на наявність локальних дефектів (тріщини, ями, люки, хвилеподібність).

Аналіз інтерактивної карти маршруту (рис. 5) підтвердив адекватність і чутливість методу. Більшість протестованої траси мала добрий стан, що підтверджувалося зеленими сегментами.

Водночас окремі ділянки виділялися жовтими та помаранчевими відмітками, що відповідає нерівностям і тріщинам. Декілька червоних сегментів локалізували зони люків та ям, які супроводжувалися різким зростанням амплітуди прискорень. Таким чином, експериментальні результати підтвердили задовільну точність та практичну придатність використання смартфонних сенсорів для оперативної оцінки дорожнього стану.

З технічного боку, система забезпечила синхронізацію даних різних сенсорів, реалізацію алгоритмічної обробки з урахуванням похибок GPS і зміщення акселерометра, а також візуалізацію результатів на інтерактивних мапах і графіках. Це відкриває перспективи створення мобільного застосунку, здатного у реальному часі інформувати користувачів про небезпечні ділянки та формувати карти дорожніх дефектів у міському масштабі.

Подальший розвиток системи передбачає вдосконалення методів нормалізації сигналів з урахуванням типу транспортного засобу й швидкості руху, розширення набору вібраційних характеристик (спектральний аналіз, коефіцієнти асиметрії, ентропія), а також впровадження алгоритмів машинного навчання для класифікації типів дефектів. Важливим напрямом залишається валідація даних шляхом порівняння з результатами лазерного профілювання чи візуальних обстежень, що дасть змогу підвищити достовірність і встановити нормативні пороги для автоматизованої класифікації стану дорожнього покриття.

Таким чином, апробація підтвердила ефективність і перспективність смартфонних технологій у сфері дорожнього моніторингу, що створює науково-практичне підґрунтя для подальшої розробки повноцінної системи краудсорсингового контролю транспортної інфраструктури.

Перелік посилань

1. Asian Development Bank. (2025). *Guidebook on Machine Learning Techniques for Road Quality Monitoring*. URL: <https://www.adb.org/publications/guidebook-machine-learning-road-quality>
2. Burningham, S., & Stankevich, N. (2005). *Why Road Maintenance is Important and How to Get It Done*. World Bank Transport Notes, No. 4.
3. Cadamuro, G., Muhebwa, A., & Taneja, J. (2018). Assigning a Grade: Accurate Measurement of Road Quality Using Satellite Imagery. *arXiv preprint*, arXiv:1812.01699.
4. Oshri, B., et al. (2018). Infrastructure Quality Assessment in Africa using Satellite Imagery and Deep Learning. *arXiv preprint*.
5. Gebreegziabher, B. A. (2021). *Mapping Road Pavement Quality from Optical Satellite Imagery using Machine Learning*. University of Twente.
6. Roadroid official website. URL: <https://www.roadroid.com>
7. RoadBotics official website. URL: <https://www.roadbotics.com>
8. Sayers, M. W., & Karamihas, S. M. (1998). *The Little Book of Profiling*. University of Michigan Transportation Research Institute.
9. Ghate, A. T., & Qamar, F. (2020). Pavement Condition Monitoring Using Smartphone Sensors: A Review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(2), 237–251.
10. Zhang, L., & Li, Q. (2019). A smartphone-based road roughness detection algorithm using wavelet packet transform. *Sensors*, 19(17), 3822.
11. Chien, S., Ding, Y., & Wei, C. (2002). Dynamic Bus Arrival Time Prediction with Artificial Neural Networks. *Journal of Transportation Engineering*, 128(5), 429–438.
12. SciPy Documentation. *scipy.signal.find_peaks*. URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.find_peaks.html
13. Mednis, A., Strazdins, G., Zviedris, R., Kanonirs, G., & Selavo, L. (2011). Real-time pothole detection using Android smartphones with accelerometers. *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, 1–6.
14. Douangphachanh, V., & Oneyama, H. (2014). A study on the use of smartphones for road roughness condition estimation. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 11, 1718–1732.

15. Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S., & Balakrishnan, H. (2008). The pothole patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring. *Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '08)*, 29–39.
16. Wahab, A., & Hussain, K. (2018). Road anomaly detection using smartphone sensors: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 109, 1–11.
17. Folium Documentation. *Python-visualization/folium*. URL: <https://python-visualization.github.io/folium>

SMARTPHONE-BASED MONITORING OF ROAD PAVEMENT CONDITION

Zarichnyi Anton O., Postgraduate Student, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: antohazarich@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-5723-3443>

Usychenko Olena Yu., PhD (Technical Sciences), Associate Professor, Acting Head of the Department of Transport Construction and Property Management, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: fbbk@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7482-8420>

Summary. The article substantiates the relevance of creating innovative approaches to monitoring the condition of road pavement in Ukraine, where a significant part of the road network is in poor condition, while traditional diagnostic methods are characterized by high costs and limited scalability. The aim of the research is to develop a concept of a smartphone-based monitoring system that utilizes built-in sensors (accelerometer, gyroscope, GPS) to collect and analyze telemetry data in real time.

The study reviews modern methods of pavement evaluation, outlines the technical aspects of sensor data collection, filtering, and processing, and identifies key metrics such as Root Mean Square Acceleration (*RMSA*), peak values, and spectral features of the signal. A prototype Android application was developed to record sensor data in CSV format, which was further processed in Python using libraries such as pandas, numpy, scipy, matplotlib, and folium. The results demonstrated the sensitivity of the system to differences in road quality: for smooth segments, *RMSA* values ranged from 0.3 to 1.5 m/s², while for damaged areas they exceeded 4 m/s². Visualization on interactive maps confirmed the practical applicability of the method for identifying defects such as potholes, cracks, and manholes.

The novelty of the research lies in combining sensor monitoring methods with crowdsourcing concepts, which enables large-scale data collection without the need for expensive equipment. The practical value is defined by the economic feasibility of using smartphones as measuring devices and the possibility of integration into urban transport and smart city platforms. Future research directions include improving data normalization algorithms, considering vehicle type and speed, and applying machine learning models (XGBoost, RandomForest, CNN) for defect classification.

Keywords: road pavement, smartphone, sensors, accelerometer, *RMSA*, monitoring, vibration analysis, machine learning.

References

1. Asian Development Bank. (2025). *Guidebook on Machine Learning Techniques for Road Quality Monitoring*. URL: <https://www.adb.org/publications/guidebook-machine-learning-road-quality>
2. Burningham, S., & Stankevich, N. (2005). *Why Road Maintenance is Important and How to Get It Done*. World Bank Transport Notes, No. 4.
3. Cadamuro, G., Muhebwa, A., & Taneja, J. (2018). Assigning a Grade: Accurate Measurement of Road Quality Using Satellite Imagery. *arXiv preprint*, arXiv:1812.01699.
4. Oshri, B., et al. (2018). Infrastructure Quality Assessment in Africa using Satellite Imagery and Deep Learning. *arXiv preprint*.

5. Gebreegziabher, B. A. (2021). Mapping Road Pavement Quality from Optical Satellite Imagery using Machine Learning. University of Twente.
6. Roadroid official website. URL: <https://www.roadroid.com>
7. RoadBotics official website. URL: <https://www.roadbotics.com>
8. Sayers, M. W., & Karamihas, S. M. (1998). *The Little Book of Profiling*. University of Michigan Transportation Research Institute.
9. Ghate, A. T., & Qamar, F. (2020). Pavement Condition Monitoring Using Smartphone Sensors: A Review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 7(2), 237–251.
10. Zhang, L., & Li, Q. (2019). A smartphone-based road roughness detection algorithm using wavelet packet transform. *Sensors*, 19(17), 3822.
11. Chien, S., Ding, Y., & Wei, C. (2002). Dynamic Bus Arrival Time Prediction with Artificial Neural Networks. *Journal of Transportation Engineering*, 128(5), 429–438.
12. SciPy Documentation. *scipy.signal.find_peaks*. URL: https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.find_peaks.html
13. Mednis, A., Strazdins, G., Zviedris, R., Kanonirs, G., & Selavo, L. (2011). Real-time pothole detection using Android smartphones with accelerometers. *2011 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, 1–6.
14. Douangphachanh, V., & Oneyama, H. (2014). A study on the use of smartphones for road roughness condition estimation. *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, 11, 1718–1732.
15. Eriksson, J., Girod, L., Hull, B., Newton, R., Madden, S., & Balakrishnan, H. (2008). The pothole patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring. *Proceedings of the 6th international conference on Mobile systems, applications, and services (MobiSys '08)*, 29–39.
16. Wahab, A., & Hussain, K. (2018). Road anomaly detection using smartphone sensors: A survey. *Journal of Network and Computer Applications*, 109, 1–11.
17. Folium Documentation. Python-visualization/folium. URL: <https://python-visualization.github.io/folium>