

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УДК 528.94:625.7:910:004.65](477)

ДМИТРИКОВ ОЛЕГ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

ДИСЕРТАЦІЯ

**«ВРАХУВАННЯ ПРИРОДНИХ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ В
ПРОЦЕСІ КАРТОГРАФІЧНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ
СТРУКТУР (НА ПРИКЛАДІ АВТОМОБІЛЬНИХ ШЛЯХІВ УКРАЇНИ)»**

Спеціальність 103 Науки про Землю
(Галузь знань 10 Природничі науки)

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ О. О. Дмитриков

Науковий керівник: Пересадько Віліна Анатоліївна, доктор географічних наук, професор, декан факультету геології, географії, рекреації і туризму Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Харків – 2025

АНОТАЦІЯ

Дмитриков О. О. Врахування природних і технологічних факторів в процесі картографічної візуалізації просторово-часових структур (на прикладі автомобільних шляхів України). – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 103 Науки про Землю (Галузь знань 10 Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти та науки України, Харків, 2025.

Дисертаційне дослідження проводилось упродовж 2016-2025 рр. відповідно до планів науково-дослідницьких робіт кафедри фізичної географії і картографії, міжнародних проєктів: Erasmus+ «INTENSE – Комплексна докторська школа з екологічної політики, менеджменту та техноекології» 586471-ERP-1-2017-1-EE-ERPKA2-CBHE-JP

Робота написана на основі власних польових досліджень, результатів їх камеральної обробки, аналізу відкритих даних національних геопорталів (включно із даними лазерного сканування). Було використано літературні, картографічні та фондові матеріали про об'єкт дослідження. Підґрунтям для написання кваліфікаційної наукової роботи слугував власний практичний досвід роботи у сфері автотранспортної логістики. У дисертаційному дослідженні використано сучасні методики щодо високоточного визначення протяжності автомобільних шляхів: поєднання RTK-GNSS знімання та наземного й аеролідарного сканування для отримання сантиметрової точності; покрокова фільтрація хмар точок з метою тестування впливу щільності даних на похибку довжин; побудова профілів трас на основі DEM SRTM-1 для порівняння горизонтальних протяжностей і фактичних довжин з урахуванням висоти; автоматизоване моделювання дорожньої вісі для корекції довжин за радіусами поворотів і кутами нахилу; зіставлення отриманих довжин із довжинами, розрахованими за даними Google Maps, OpenStreetMap та офіційних даних із подальшим розрахунком СКП, систематичних і випадкових похибок;

проведення статистичного тестування (t-критерій, аналіз відхилень в різних орографічних умовах) для оцінки достовірності різниць і формування алгоритму регламентованого коригування картографованих довжин.

На основі проведеного дослідження надано рекомендації для підвищення точності картографічного моделювання автотранспортних мереж України.

Дисертаційна робота складається зі вступу, трьох розділів і висновків.

У *вступі* висвітлено актуальність теми, означено мету, завдання, об'єкт та предмет дослідження. Розкрито практичне та теоретичне значення дисертаційного дослідження, окреслено наукову новизну основних результатів, а також наведено відомості про їх апробацію.

У *першому розділі* представлено огляд літературних джерел, що послуговували базисом для написання дисертаційного дослідження та висвітлено методологічне підґрунтя, що стало основою проведення комплексного дослідження.

У *підрозділі 1.1* розкривається еволюція поняття простору від античних уявлень про «порожнечу» атомістів і платонівську *khôra* до ньютонівського «абсолютного простору» та реляційної концепції Лейбніца. Показано, як із поступом філософії й науки простір переосмислювався: від статичного тла для розташування тіл – до динамічної, багатовимірної категорії, що взаємодіє з часом у релятивістському континуумі Ейнштейна. Таким чином встановлено методологічне підґрунтя для подальшого розгляду просторово-часових структур у картографічному моделюванні.

У *підрозділі 1.2* розглядається категорія часу – від її історико-філософського осмислення до прикладних інтерпретацій у науках про Землю та картографії. Наголошено, що у фізиці та філософії еволюція уявлень про час від античної лінійності через ньютонівський «абсолют» до релятивістського чотиривимірного континууму сформувала сучасне розуміння простору-часу як динамічної системи, яка взаємодіє з матерією. У географічній науці представлено концепції ієрархії ритмів та «часових горизонтів» територіальних систем, що дозволяють аналізувати зміни від нано- до багаторічних масштабів. Часова географія, доповнена можливостями сучасних ГІС, демонструє, як

просторові та часові обмеження поєднуються у моделях руху людей і об'єктів. Окремо розглянуто еволюцію і можливості картографії при передачі інформації про динамічний розвиток об'єктів, процесів і явищ у часі: від статичних паперових карт, що фіксували стан об'єкта «на момент знімання», до інтерактивних багатовимірних моделей, які оновлюються оперативно, в режимі, наближеному до реального часу. Таке розширення темпоральної точності розглядається як фундамент для адекватного відображення просторово-часових структур у подальших розділах роботи.

Підрозділ 1.3 окреслює еволюцію самого поняття «просторово-часова структура» у науках про Землю, підкреслюючи нерозривність просторової конфігурації та часових ритмів. Від античних інтуїцій до сучасної багатомасштабної концепції простір і час розглядаються як єдина змінна, що дозволяє трактувати автомобільну мережу не просто як лінійний набір доріг, а як динамічну систему зі станами, що змінюються на різних часових інтервалах і в різних масштабах. Такий підхід уможливорює проведення ГІС-аналізу та прогнозування змін ПЧС мережі автотранспортних шляхів. точності Крім того, ми подаємо широке розуміння точності – не лише як просторової точності локалізації, а й точності (достовірності, оперативності) відображення часових змін під впливом короткочасних і довготривалих природних (рельєф, гідрографія, погодні та кліматичні зміни, рослинність) та антропогенних (інфраструктура, дорожнє покриття, його стан тощо) факторів.

У *підрозділі 1.4* подано розгорнуту класифікацію автомобільних доріг, де адміністративні, функціональні, інженерні й ландшафтні ознаки інтегруються в єдину схему. Запропоновано формалізований перелік компонентів просторово-часової структури шляху: дорожні сегменти, вузлові розв'язки, штучні споруди, сервісні об'єкти, системи контролю та допоміжні геоінженерні елементи. Для кожного об'єкта визначено код й агреговані елементи, щоб зберігати топологічну та метричну узгодженість карт за переходу між масштабами. Така декомпозиція створює методичну основу, на якій у подальших розділах будуються алгоритми підвищення точності та моделі багатомасштабної візуалізації.

Другий розділ дисертаційного дослідження присвячено сутності, особливостям і досвіду картографування автомобільних шляхів.

У *підрозділі 2.1* автомобільна дорога розглядається як комплексний об'єкт картографічного моделювання: від лінійної інженерної споруди, що змінює ландшафт і формує придорожні екосистеми, до динамічної просторово-часової структури з мінливими технічними, екологічними та соціально-економічними параметрами. Показано, що експлуатаційна мережа магістралей інтегрується у різні фізико-географічні зони, впливаючи на рельєф, гідрологічний баланс, мікроклімат і біотопи, а її лінійність одночасно слугує бар'єром і каналом обміну речовини та енергії. Окреслено залежність кінцевої картографічної візуалізації від цільової аудиторії та запиту на створення карти. Підкреслено, що умовний лінійний знак дороги містить невід'ємні фальсифікації, пов'язані зі спрощенням геометрії й проєктуванням на площину, через що точність картометричних вимірів може відхилятися від реальних.

У *підрозділі 2.2* представлено порівняльний аналіз точності різних способів визначення довжини автомобільних шляхів відповідно до їх офіційних значень. Співставлено офіційні значення довжин окремих магістралей (A2 у Німеччині, A7 у Франції, A4 у Польщі, M-3 у Великій Британії, I-75 у США, 401 у Канаді та M-22 в Україні) з довжинами, отриманими за інструментальними вимірюваннями на національних геопорталах, GM і OSM. Встановлено, що у більшості країн ця розбіжність не перевищує $\pm 1\%$, тоді як для української дороги M-22 горизонтальна проєкція стабільно завищує офіційний показник на $\approx 11\%$, що створює ризик появи неточностей у логістичному плануванні та призводить до нераціонального використання ресурсів. Встановлено, що усі портали повертають лише довжину горизонтального прокладення, і користувачі отримують дані «як є» без гарантій точності і відповідності реальній протяжності. Таким чином, у цифрову епоху точність картографічної візуалізації доріг лишається залежною від масштабно-символьних рішень, якості вихідної геодезичної основи та регулярності оновлення даних, а найбільші ризики виникають там, де ці компоненти системно недооцінюються.

У підрозділі 2.3 систематизовано фактори, що визначають метричну і візуальну точність карт автомобільних доріг, зводячи їх до трьох взаємодоповнюючих блоків: організаційно-регуляторного (якість і стандартизованість даних та метаданих, наявність фахових кадрів, стабільність нормативної бази), природного (рельєф, гідрографія, кліматично-погодні умови та рослинність, які задають просторово-часові особливості структур) та технологічного (щільність і методи лазерного знімання та GNSS-знімання, проєкційні трансформації, алгоритми мультимасштабної генералізації й частота оновлення шарів). Проведений аналіз показує їх кумулятивний внесок у формуванні величини похибки. Підрозділ завершується практичними орієнтирами, які слугують основою для розробки алгоритмів підвищення точності у наступних розділах.

У третьому розділі викладено результати експериментальних досліджень з підвищення метричної точності карт автомобільних шляхів.

У підрозділі 3.1 викладено перший етап експериментального дослідження, у межах якого точність відображення довжин автомобільних доріг перевірялась шляхом безпосереднього співставлення даних мобільного лазерного сканування з еталонними результатами RTK-GNSS-знімання на ділянці траси М-03 у Харківській області. Детально описано алгоритм: від попередньої обробки хмари точок і відбору 12 контрольних сегментів (~150 м кожен) до обчислення середньоквадратичних похибок для координат X та Y і розрахунку горизонтальних прокладень. Отримані значення СКП (≈ 3 мм по плану) та розбіжність у сумарній довжині (5,7 мм, тобто 0,00034% на відрізку 1,67 км) продемонстрували практично повну метричну відповідність між лазерним і геодезичним зніманням, що дало підстави застосувати дані лазерного знімання як еталон при подальших розрахунках. На тестовій ділянці I-189 у штаті Вермонт, США задано 16 контрольних сегментів (~150 м кожен), координати контрольних точок трансформовано з NAD 83 до WGS 84 і визначено, що сама трансформація спричиняє зсув ≈ 6 м (0,25%) на відрізку 2,4 км, тоді як різниця між довжинами, отриманими за даними лазерного сканування в QGIS і сервісами OSM, GH та GM, коливається в межах ± 2 м, із

середньоквадратичними похибками $0,83 \text{ м}^2$, $0,19 \text{ м}^2$ та $0,59 \text{ м}^2$ відповідно. Аналогічний аналіз для ділянки траси М-03 в Україні показав відхилення того ж порядку, підтвердивши, що GN найточніше відтворює горизонтальне прокладення, тоді як OSM і GM дають трохи більше розходження.

У підрозділі 3.2 показано вплив орографічних умов на точність визначення довжин автодоріг. Встановлено, що на експериментальних ділянках траси І-80 у гірській місцевості (базова щільність $0,69 \text{ точок/м}^2$, середній ухил $4,9\%$) та траси М-03 на рівнині (278 точок/м^2 , ухил $2,3\%$) довжини, отримані з високощільних хмар точок, отриманих за допомогою лазерного сканування, прийнято за еталонні. Послідовне проріджування хмар точок показало, що для гірської місцевості похибка горизонтального прокладення зростає з $0,28\%$ до $0,71\%$, а довжини з урахуванням висоти з $0,29\%$ до $0,74\%$ при зменшенні щільності до $0,001 \text{ точок/м}^2$ (інтервал $\approx 26,8 \text{ м}$). Для рівнинних ділянок навіть екстремальне проріджування до трьох точок на 2 км дало менші відхилення: $0,45\%$ для горизонтального прокладення та $0,64\%$ для довжини з урахуванням висоти. Таким чином, встановлено, що при кожному двократному зменшенні щільності точок похибка на гірських дорогах наростає у $2\text{--}4$ рази швидше, ніж на рівнинних. Щоб утримати відхилення $<0,35\%$, у складному рельєфі потрібна щільність не нижче $0,44 \text{ точок/м}^2$ (інтервал $\leq 1,5 \text{ м}$), тоді як на рівнинах досить $0,015 \text{ точок/м}^2$ (інтервал $\leq 8 \text{ м}$). Таким чином, рельєф-залежні вимоги до щільності лазерного знімання є критичними для забезпечення метричної достовірності карт автомобільних шляхів.

У підрозділі 3.3 проаналізовано метричну достовірність електронних карт OpenStreetMap, GraphHopper і Google Maps, застосувавши їх для вимірювання протяжності шести автомагістралей на території США (І-5, І-10, І-40, І-75, І-90, І-95) та двадцяти трьох міжнародних доріг України. Еталонні значення взято з офіційних реєстрів FHWA і Кабінету Міністрів України; для кожної траси обчислено різницю між довжиною, отриманою за даними онлайн-платформ, та офіційною довжиною, перевірено нульову гіпотезу про відсутність систематичного зміщення за допомогою одновибіркового t-тесту. Для американських магістралей розраховані відхилення коливаються від $+0,25\%$ до

-1,15% (від -27,65 км до +5,63 км), найменша розбіжність зафіксована при використанні онлайн-платформи GraphHopper, тоді як Google Maps і OSM дають більшу амплітуду похибок, особливо при вимірюванні довжини маршруту від початкової до кінцевої точки без коригування. Статистичний аналіз показав, що при $\alpha = 0,05$ (рівень імовірності 5%) систематичний зсув фіксується лише в двох комбінаціях: для суми сегментів за GraphHopper та для маршруту з коригуванням за Google Maps; за жорсткішого критерію $\alpha = 0,01$ (рівень імовірності 1%) систематичність не підтвердилася у жодному випадку, отже більшість похибок для розрахованих довжин автомобільних шляхів в США мають випадковий характер. Для міжнародних доріг України середня офіційна довжина вибірки становить 216,20 км, а всі три платформи систематично занижують протяжність: сумарне зміщення дорівнює -8,90 км для OpenStreetMap, -8,97 км для GraphHopper і -9,03 км для Google Maps, що відповідає близько -41 м на кожен кілометр маршруту. При вимірюванні довжини однією лінією маршруту відхилення ще більше: від -9,87 км до -9,34 км, що свідчить про кумулятивний ефект спрощення траси при автоматичному згладжуванні доріг. За результатами t-тесту жоден набір українських даних не показав $|t| > t_{\text{критичного}}$ при $\alpha = 0,05$ (рівень імовірності 5%), тож варіація похибки залишається статистично випадковою й не демонструє стабільного систематичного дрейфу. Таким чином, електронні карти забезпечують прийнятну (<1%) метричну точність для протяжних магістралей США, особливо при розрахунку маршруту з його коригуванням за допомогою онлайн-платформи GraphHopper; але для українських міжнародних доріг спостерігається розбіжність довжин доріг, розрахована за онлайн-платформами від -20% до +13,5% відносно офіційних даних. Результати підкреслюють необхідність враховувати вплив природних факторів, зокрема орфографічного, при картографічному, геоінформаційному моделюванні та картографічній візуалізації автомобільних шляхів.

У підрозділі 3.4 надано SWOT-аналіз впровадження високоточних моделей автомобільних доріг України, де у блоці «Сильні сторони» відзначено зниження витрат на ремонт і пальне, підвищення безпеки руху та точності

військової логістики; «Слабкі сторони» охоплюють високу вартість первинної зйомки й дефіцит кваліфікованих кадрів; «Можливості» пов'язані з розвитком державної хмари точок, зібраної за допомогою лазерного сканування, відкритими API для бізнесу та інтеграцією модулів до картографічних онлайн-платформ та ГІС продуктів, що ширше інформують про природні фактори вздовж прокладених маршрутів; «Загрози» стосуються кіберризиків, нерівномірного доступу до технологій і потенційної комерціалізації критичних даних.

У підрозділі 3.5 надано рекомендації щодо підвищення точності, а саме:

1. Офіційно затвердити мінімально допустиму щільність лазерного сканування: не менше 0,5 точок/м² у гірських районах і 0,02 точок/м² на рівнинах. Така норма є базовою передумовою для побудови високоточної цифрової моделі місцевості, що лягає в основу алгоритму підвищення точності картографічної візуалізації.

2. Регламентувати періодичність оновлення національної цифрової моделі поверхні: у зонах складного рельєфу – не рідше одного разу на три роки, на рівнинних територіях – раз на п'ять років, із обов'язковим урахуванням придорожніх природних факторів. Регулярне оновлення забезпечить актуальність даних для всіх груп користувачів, визначених у SWOT-аналізі.

3. Установити вимогу зберігати вихідні координати в нативних системах із однозначним документуванням параметрів трансформації у метаданих згідно з ISO 19115-1 / ДСТУ ISO 19115-1:2021. Такий підхід мінімізує трансформаційні похибки й полегшує інтеграцію даних у багатоплатформні навігаційні сервіси.

4. Створити на базі Національного геопорталу єдиний хмарний сервіс даних лазерного сканування, який акумулюватиме та зберігатиме щільні хмари точок для подальших наукових досліджень, моніторингу просторово-часової динаміки та формування «цифрових відбитків» стану геосистем і антропогенних ландшафтів.

5. Розробити інтегровані модулі для онлайн-картографічних платформ, що автоматично враховуватимуть природні чинники (рельєф, гідрографію, кліматичну інформацію, інформацію про погоду, рослинність) та оперативно

попереджатимуть водіїв про потенційні ризики на маршруті; це підвищить цінність високоточних моделей для масового користувача й професійних служб.

6. Переглянути статус і освітню траєкторію спеціальності «картографія», розробивши національну стратегію розвитку всієї галузі з метою відновлення професійної підготовки, підвищення картографічної грамотності населення та стабільного кадрового забезпечення проєктів високоточної візуалізації.

Ключові слова: автомобільні шляхи, візуалізація інформації, геоінформаційне моделювання, картографічна похибка, лазерне сканування, природнича освіта, природні фактори, просторово-часові структури, реконструкція лінійно-дорожніх ландшафтів, технологічні фактори, точність карт.

ABSTRACT

Dmytrykov O. O. Taking into account natural and technological factors in the process of cartographic visualization of spatial-temporal structures (on the example of motorways in Ukraine).

Thesis for the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 103 Earth Sciences (Degree in 10 – Natural sciences). – V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2025.

The dissertation research was carried out during 2016-2025 in accordance with the research plans of the Department of Physical Geography and Cartography and international projects: Erasmus+ «INTENSE – Integrated Doctoral School on Environmental Policy, Management and Techno-Ecology» 586471-EPP-1-2017-1-EE-EPPKA2-CBHE-JP.

The work is based on the author's own field surveys, their subsequent camera processing, and the analysis of open-access datasets provided by national geoportals, including country-wide LiDAR acquisitions. Supplementary literary, cartographic and archival sources on the study area were consulted, while the author's practical background in road-transport logistics served as an additional empirical foundation. The dissertation applies state-of-the-art techniques for high-precision determination of road length: the integration of RTK-GNSS surveying with terrestrial and airborne LiDAR scanning to reach centimetre-level accuracy; stepwise filtering of point-cloud densities to quantify how data sparsity affects length error; generation of route profiles from the SRTM-1 DEM to compare planimetric lengths with true 3-D lengths that incorporate elevation; automated modelling of the roadway centreline to correct lengths for curve radii and longitudinal gradients; and a systematic comparison of the resulting lengths with those derived from Google Maps, OpenStreetMap and official registers, followed by computation of root-mean-square error, as well as systematic and random components of error. Statistical testing (Student's *t*-test and deviation analysis across contrasting orographic settings) is employed to assess the reliability of the observed differences and to formulate an algorithm for the regulated correction of mapped road lengths.

Building on the results obtained, the dissertation formulates a set of recommendations aimed at improving the cartographic modelling accuracy of road-transport networks in Ukraine.

The thesis consists of an introduction, three chapters and conclusions.

The *introduction* highlights the relevance of the topic, defines the purpose, objectives, object and subject of the study. The author reveals practical and theoretical significance of the research, outlining scientific novelty of the main results, providing the information on their testing.

The *first chapter* gives an overview of the current literature sources that served as the basis for the thesis research and highlights the methodological framework that formed the basis for the comprehensive study.

Sub-section 1.1 traces the evolution of the concept of space, beginning with the atomists' notion of "void" and Plato's *khôra*, through Newton's "absolute space" and Leibniz's relational view, to the Einsteinian relativistic continuum. It demonstrates how philosophical and scientific progress recast space from a static backdrop for locating bodies into a dynamic, multidimensional category that interacts with time. This historical perspective provides the methodological foundation for analysing spatio-temporal structures in cartographic modelling.

Sub-section 1.2 examines the category of time – from its historical-philosophical interpretations to its applied readings in Earth sciences and cartography. It emphasises that the intellectual trajectory from classical linearity, via Newton's "absolute" and the relativistic four-dimensional continuum, has shaped today's understanding of space–time as a dynamic system coupled to matter. Within geographic science, the concepts of rhythm hierarchies and "temporal horizons" of territorial systems enable the analysis of change from nano- to multi-year scales. Time-geography, now enhanced by modern GIS capabilities, illustrates how spatial and temporal constraints fuse in models of human and object movement. The sub-section also charts the evolution of cartography's ability to portray temporal dynamics: from static paper maps that captured objects "at the moment of survey" to interactive, multi-dimensional models updated in near-real time. This expansion of

temporal resolution is framed as the essential basis for the faithful representation of spatio-temporal structures in the subsequent chapters.

Sub-section 1.3 delineates the evolution of the very concept of a **spatio-temporal structure** within the Earth sciences, underscoring the inseparability of spatial configuration and temporal rhythms. From classical intuitions to contemporary multiscale theory, space and time are treated as a single variable, which allows the road network to be viewed not merely as a linear assemblage of roads but as a dynamic system whose states shift across multiple temporal intervals and spatial scales. This perspective enables advanced GIS analysis and the forecasting of spatio-temporal transformations within the highway system. Furthermore, the dissertation adopts a broad definition of **accuracy** – one that extends beyond geometric positional precision to include the reliability, timeliness and responsiveness with which temporal changes are represented under the influence of both short- and long-term natural drivers (topography, hydrography, weather and climatic variability, vegetation) and anthropogenic factors (infrastructure, pavement type and condition, and related attributes).

Sub-section 1.4 identifies an extended classification of motor roads in which administrative status, functional hierarchy, engineering specifications and landscape setting are integrated into a single coherent scheme. A formalised inventory of spatio-temporal components is introduced, encompassing road segments, junctions and interchanges, engineered structures, service facilities, monitoring systems and auxiliary geo-engineering elements. Each object is assigned a unique code together with a set of aggregated attributes so that topological and metric consistency of cartographic products is preserved when shifting between map scales. This decomposition provides the methodological scaffold upon which the subsequent chapters develop both the accuracy-enhancement algorithms and the models for multiscale visualisation.

The *second chapter* of the thesis focuses on the essence, distinctive characteristics, and accumulated practical experience of cartographically representing highway networks.

Sub-section 2.1 highlights the meaning of the highway as a complex cartographic entity whose representation spans several conceptual levels: (i) a linear engineering structure that reshapes the landscape and generates roadside ecosystems, and (ii) a dynamic spatio-temporal system whose technical, environmental and socio-economic parameters evolve over time. The analysis shows that the operational network of motorways is embedded within a variety of physiographic zones and, in doing so, affects relief, hydrological balance, micro-climate and biotopic patterns; its linear form simultaneously acts as both a barrier and a conduit for the exchange of matter and energy. The final cartographic visualisation is demonstrated to depend critically on the target audience and the specific purpose for which the map is created. It is emphasised that the conventional line symbol used to depict a road inevitably entails geometric simplifications and the projection of three-dimensional reality onto a plane, whereby the accuracy of cartometric measurements may diverge from actual ground truth.

Sub-section 2.2 focuses on a comparative assessment of the accuracy with which road lengths are determined relative to their officially reported values. The analysis juxtaposes the certified lengths of several flagship motorways – A2 (Germany), A7 (France), A4 (Poland), M-3 (United Kingdom), I-75 (United States), Highway 401 (Canada) and M-22 (Ukraine) – with lengths derived from instrumental measurements available on national geoportals as well as from Google Maps (GM) and OpenStreetMap (OSM). In most countries the discrepancy between official figures and horizontally projected lengths returned by these platforms does not exceed ± 1 %. By contrast, for Ukraine's M-22 the planimetric length reported by all services systematically overestimates the official value by approximately 11 %, a divergence that poses tangible risks for logistical planning and leads to inefficient resource allocation. The study further reveals that every portal supplies only the horizontal (plan-view) distance, delivering data “as is” with no guarantee of fidelity to the true three-dimensional extent. Consequently, even in the digital era the metric reliability of road cartography remains contingent on scale–symbol design choices, the quality of the underlying geodetic framework and the regularity with which data

are updated; the greatest vulnerabilities arise where these components are chronically undervalued.

Sub-section 2.3 systematises the determinants of both metric and visual accuracy in road maps, organising them into three complementary domains. The *organisational–regulatory block* encompasses the quality and standardisation of primary data and metadata, the availability of qualified personnel, and the stability of the normative framework governing spatial information. The *natural block* covers relief, hydrography, weather-climatic conditions and vegetation – environmental variables that impart specific spatio-temporal signatures to highway structures. The *technological block* comprises survey parameters such as LiDAR and GNSS point-cloud density, projection and transformation procedures, multiscale generalisation algorithms and the update frequency of geospatial layers. Integrative analysis confirms that these factors act cumulatively, jointly determining the overall magnitude of mapping error. The sub-section closes with a set of practical benchmarks that form the operational basis for the accuracy-enhancement algorithms developed in the subsequent chapters.

The *third section* presents the results of experimental research on improving the metric accuracy of road maps.

Sub-section 3.1 describes the initial experimental stage, in which the positional fidelity of road-length depiction was evaluated by a direct comparison of mobile LiDAR data with reference RTK-GNSS measurements. The test site was a 1.67 km segment of the M-03 highway in Kharkiv Oblast. The workflow – spanning pre-processing of the point cloud, selection of twelve control segments (~150 m each), and computation of root-mean-square errors (RMSE) for the X and Y coordinates – yielded a planimetric RMSE of ≈ 3 mm and a cumulative length discrepancy of only 5.7 mm (0,00034 %), indicating virtually perfect metric agreement between the LiDAR and geodetic surveys; the LiDAR data were therefore adopted as the reference benchmark for subsequent analyses. A parallel experiment on a 2.4 km portion of Interstate 189 in Vermont, USA, employed sixteen control segments of comparable length. Transformation of the control-point coordinates from NAD 83 to WGS 84 introduced a systematic shift of ≈ 6 m (0,25 %), whereas the differences

between LiDAR-derived lengths calculated in QGIS and those returned by OpenStreetMap (OSM), GraphHopper (GH) and Google Maps (GM) remained within ± 2 m, with mean-square deviations of 0,83 m², 0,19 m² and 0,59 m², respectively. An analogous assessment for the M-03 segment in Ukraine produced discrepancies of the same order, confirming that GH reproduces the plan-view alignment most accurately, while OSM and GM exhibit slightly larger departures.

Sub-section 3.2 evaluates how orographic settings affect the accuracy of road-length determination. Two experimental sites were selected: a mountainous stretch of Interstate 80 (baseline point-cloud density 0,69 pts m⁻²; mean gradient 4,9 %) and a level segment of the M-03 highway (278 pts m⁻²; gradient 2,3 %). For both, the high-density LiDAR point clouds were adopted as reference. Progressive thinning of the clouds revealed that, in mountainous terrain, the planimetric error rose from 0,28 % to 0,71 %, while the 3-D length error increased from 0,29 % to 0,74 % when the density was reduced to 0.001 pts m⁻² (point spacing $\approx 26,8$ m). On the plains, even an extreme reduction to three points per 2 km produced smaller deviations: 0,45 % planimetric and 0,64 % 3-D. Hence, with every twofold decrease in point-cloud density the error on mountainous roads grows two- to four-times faster than on low-relief sections. To keep deviations below 0,35 %, a density of at least 0,44 pts m⁻² ($\leq 1,5$ m spacing) is required in complex topography, whereas 0,015 pts m⁻² (≤ 8 m spacing) suffices on the plains. The study therefore demonstrates that relief-dependent specifications for LiDAR acquisition density are critical to maintaining the metric reliability of highway maps.

Sub-section 3.3 evaluates the metric reliability of three widely used web-mapping platforms – OpenStreetMap (OSM), GraphHopper (GH) and Google Maps (GM) – by applying them to length measurements of six U.S. interstate highways (I-5, I-10, I-40, I-75, I-90, I-95) and twenty-three international highways in Ukraine. Official lengths were obtained from the Federal Highway Administration (FHWA) and the Cabinet of Ministers of Ukraine, respectively. For each route the difference between the platform-based length and the official benchmark was computed, and a one-sample *t*-test was used to examine the null hypothesis of zero systematic bias.

For the U.S. sample, individual deviations range from +0,25 % to -1,15 % (from -27,65 km to +5,63 km). The smallest dispersion is achieved with GraphHopper, whereas GM and OSM exhibit larger error amplitudes, especially when lengths are derived from a single, uncorrected start–end line. At $\alpha = 0,05$ a systematic shift is detected only in two cases – the segment-sum method in GH and the corrected route length in GM; under the stricter $\alpha = 0,01$ none of the datasets display significant bias, indicating that most U.S. errors are random.

For the Ukrainian network (mean official length 216,20 km) all three platforms consistently underestimate mileage: cumulative offsets amount to -8,90 km for OSM, -8,97 km for GH and -9,03 km for GM, or roughly -41 m per kilometre. When the route is measured as a single polyline, the shortfall increases further (from -9.87 to -9.34 km), reflecting the cumulative smoothing of road curvature. Yet none of the Ukrainian datasets produce $|z|$ values exceeding the critical threshold at $\alpha = 0.05$, so the variance remains statistically random and does not exhibit a persistent drift.

Accordingly, web maps deliver acceptable (<1%) metric accuracy for long-distance U.S. interstates – particularly when route lengths are corrected with GraphHopper – but for Ukraine’s international highways discrepancies ranging from -20% to +13,5% relative to official figures are observed. The findings underscore the need to account for natural controls, notably orographic complexity, when conducting cartographic or GIS-based modelling and visualisation of road networks.

Sub-section 3.4 provides a SWOT analysis of the implementation of high-precision models of Ukrainian motorways, where the ‘Strengths’ section notes a reduction in repair and fuel costs, improved traffic safety and military logistics accuracy; ‘Weaknesses’ include the high cost of initial surveying and a shortage of qualified personnel; ‘Opportunities’ are related to the development of a state cloud of points collected using laser scanning, open APIs for business, and the integration of modules into online mapping platforms and GIS products, which provide more information about natural factors along the routes; ‘Threats’ relate to cyber risks, uneven access to technology, and the potential commercialisation of critical data.

Subsection 3.5 provides recommendations for improving accuracy, namely:

1. Formally approve the minimum permissible density of laser scanning: not less than 0,5 points/m² in mountainous areas and 0,02 points/m² on plains. This standard is a basic prerequisite for building a high-precision digital terrain model, which forms the basis of the algorithm for improving the accuracy of cartographic visualisation.

2. Regulate the frequency of the updates of the national digital surface model: in areas with complex terrain – at least once every three years, in flat areas – once every five years, with mandatory consideration of roadside natural factors. Regular updates will ensure that the data is relevant for all user groups identified in the SWOT analysis.

3. Establish a requirement to store source coordinates in native systems with unambiguous documentation of transformation parameters in metadata in accordance with ISO 19115-1 / DSTU ISO 19115-1:2021. This approach minimises transformation errors and facilitates the integration of data into multi-platform navigation services.

4. Create a unified cloud-based laser scanning data service based on the National Geoportal, which will accumulate and store dense point clouds for further scientific research, monitoring of spatio-temporal dynamics, and the formation of ‘digital footprints’ of the state of geosystems and anthropogenic landscapes.

5. Develop integrated modules for online mapping platforms that will automatically take into account natural factors (relief, hydrography, climate information, weather information, vegetation) and promptly warn drivers of potential risks on the route; this will increase the value of high-precision models for mass users and professional services.

6. Review the status and educational trajectory of the cartography speciality by developing a national strategy for the development of the entire industry with the aim of restoring professional training, increasing the cartographic literacy of the population, and ensuring a stable supply of personnel for high-precision visualisation projects.

Keywords: motorways, information visualisation, geoinformation modelling, cartographic error, laser scanning, natural science education, natural factors, spatio-temporal structures, reconstruction of linear road landscapes, technological factors, map accuracy.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Дмитриков О. Поняття про фальсифікаційну карту як невід’ємний елемент інформаційного суспільства. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2017. Вип. 25. С. 24–27.

Ключові слова: картографія, інформація, дезінформація, етимологія терміну «фальсифікація», картографічний твір, фальсифікаційна карта.

Режим доступу: <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/9084/8607>

2. Пересадько В., Дмитриков О., Джос А. Аналіз точності картографічної інформації (на прикладі відображення автомобільних шляхів України і США). *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2024. Вип. 40. С. 32–39.

Ключові слова: транспортна мережа, автомобільні шляхи, точність карт, картографічне моделювання, Google Maps, OpenStreetMap, модель GraphHopper, лазерне сканування.

DOI: 10.26565/2075-1893-2024-40-04

URL: <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/25866>

(*Особистий внесок здобувача*: обґрунтування точності вимірювань горизонтальних прокладень і довжин відстаней різними способами, створення порівняльних таблиць і формування висновків щодо невідповідності представлених в картографічних матеріалах і програмних продуктах довжин ліній їх фактичним розмірам).

(*Пересадько В.*: Аналіз зарубіжного досвіду, представлення оновленої концепції поняття точності карти).

(*Джос А.*: Перевірка результатів дослідження у фондових матеріалах «Укргеодезкартографії»).

3. Дмитриков О. Поняття точності карт автотранспортних шляхів України: економічний аспект. *Часопис соціально-економічної географії*. 2024. Вип. 37. С. 92–100.

Ключові слова: економічні наслідки, точність карт, картографічне моделювання автомобільних шляхів, картографічна похибка, логістичні витрати, лідарні дані, геодезична основа карт автошляхів

DOI: 10.26565/2076-1333-2024-37-09

URL: <https://periodicals.karazin.ua/soccecongeo/issue/view/1557>

4. Дмитриков О. О. Просторово-часові структури автомобільної мережі України: стан і перспективи картографічного моделювання. *Фізична географія та геоморфологія*. 2024. Т. 47, № 5–6 (127–128). С. 47–53.

Ключові слова: просторово-часові структури, автомобільна мережа, картографічне моделювання, ГІС-технології, лазерне сканування, динамічні зміни

DOI: 10.17721/phgg.2024.5-6.05

URL: <https://phgg.knu.ua/archive/47/3/47>

5. Пересадько В., Дмитриков О., Єсіпов А. Вплив природних факторів на точність картографічної візуалізації просторово-часових структур автомобільних шляхів України. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2025. Вип. 41. С. 27–34.

(*Особистий внесок здобувача: обґрунтування впливу рельєфу на точність картографічної візуалізації просторово-часових структур автомобільних шляхів України і деяких країн світу, систематизація природних факторів *рельєф, гідрографія, погодно-кліматичні умови, рослинність в єдину систему*).

(*Пересадько В.: обґрунтування впливу кліматичних факторів і погодних умов на ступінь картографічної візуалізації часових структур*).

(*Єсіпов А.: збір вихідних матеріалів щодо впливу придорожньої рослинності на безпеку руху транспорту*).

Ключові слова: автомобільні шляхи, точність карт, картографічна візуалізація, природні фактори, підтоплення, паводки, гідрометеорологічні умови, небезпечні погодні умови, природні ландшафти, рослинність, умовні знаки, легенди карт, Google Maps, OpenStreetMap

DOI: 10.26565/2075-1893-2025-41-03.

URL: <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/26573>

Наукові публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертаційного дослідження:

1. Пересадько В. А., **Дмитриков О. О.**, Прасул Ю. І. Нова гармонізація в освіті України – старі проблеми. *Географічна наука та освіта: перспективи й інновації* : зб. матеріалів IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Переяслав, 19–20 верес. 2024 р.) / редкол.: Коцур В. В., Руденко Л. Г., Маруняк Є. О. та ін. Переяслав, 2024. С. 122–126.

2. **Дмитриков О. О.** Картографічна освіта як один із інструментів вирішення екологічних проблем в Україні: сучасні виклики та перспективи. *Охорона довкілля* : зб. наук. ст. XX Всеукр. наук. Таліїв. читань (Харків, 25 жовт. 2024 р.) / ХНУ імені В. Н. Каразіна, Навч.-наук. ін-т екології. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. С. 115–117.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	25
ВСТУП.....	29
РОЗДІЛ 1. ФІЛОСОФСЬКІ ПІДХОДИ ДО РОЗУМІННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ СТРУКТУР В ПРИРОДНИЧИХ НАУКАХ.....	35
1.1 Еволюція підходів до поняття простору.....	35
1.2 Еволюція підходів до поняття часу.....	40
1.3 Особливості формування сутності просторово-часових структур в науках про Землю.....	45
1.3.1 Особливості і проблеми візуалізації автомобільних шляхів як складних ПЧС.....	48
1.4 Класифікації просторово-часових структур автотранспортних шляхів.....	58
1.4.1 Класифікації автомобільних доріг та їх декомпозиція.....	58
1.4.2 Систематизовані переліки компонентів ПЧС автомобільних шляхів на основі декомпонованих класифікацій.....	69
Висновки до першого розділу.....	83
РОЗДІЛ 2. СУТНІСТЬ, ОСОБЛИВОСТІ І ДОСВІД КАРТОГРАФУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ШЛЯХІВ.....	84
2.1 Автомобільні шляхи як об'єкт картографічного моделювання	85
2.2 Особливості картографічного відображення автомобільних шляхів в Україні і світі.....	90
2.3 Фактори, що впливають на точність і формують особливості картографічної візуалізації автомобільних шляхів.....	105
2.3.1 Організаційно-регуляторні фактори.....	105
2.3.2 Природні фактори.....	113
2.3.2.1 Рельєф.....	113
2.3.2.2 Гідрографія.....	116
2.3.2.3 Клімат і погода.....	119
2.3.2.4 Рослинність.....	121
2.3.3 Технологічні фактори.....	124
Висновки до другого розділу.....	128

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ПІДВИЩЕННЯ	130
МЕТРИЧНОЇ ТОЧНОСТІ КАРТ АВТОМОБІЛЬНИХ ШЛЯХІВ	
3.1 Визначення розбіжностей у точності відображення довжин	131
автошляхів при застосуванні різних технологій.....	
3.2 Визначення впливу орографічних умов на точність	146
визначення довжин автошляхів.....	
3.3 Визначення розбіжностей у точності відображення довжин	153
автошляхів при застосуванні різних онлайн-платформ.....	
3.4 Визначення перспектив застосування високоточних	204
картографічних моделей для різних груп користувачів.....	
3.5 Рекомендації з підвищення точності візуалізації	209
автомобільних шляхів.....	
Висновки до розділу 3.....	210
ВИСНОВКИ.....	213
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	216
ДОДАТОК А.....	230

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АШ – автомобільні шляхи

ДСТУ – Державний стандарт України

КМУ – Кабінет Міністрів України

МСКО – Міжнародна стандартна класифікація освіти

ПЗ – програмне забезпечення

ПЧС – просторово-часові структури

СКП – середньоквадратична похибка

США – Сполучені Штати Америки

УСК-2000 – Українська система координат 2000 року

ЮНЕСКО – Організація Об'єднаних Націй з питань освіти, науки і культури
(UNESCO – United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)

AR – штат Арканзас, США (Arkansas)

AZ – штат Аризона, США (Arizona)

CA – штат Каліфорнія, США (California)

САН – Ієрархічна система для агрегування предметів у вищій освіті Великої Британії (Common Aggregation Hierarchy) (заснована на HECoS)

CIP – Класифікація освітніх програм у США (Classification of Instructional Programs)

CT – штат Конектикут, США (Connecticut)

DE – штат Делавер, США (Delaware)

DEM SRTM1 – цифрова модель рельєфу (Digital Elevation Model) створена в межах Shuttle Radar Topography Mission з просторовим розрізненням 1 кутової секунди

DFG – Німецьке науково-дослідне товариство (Deutsche Forschungsgemeinschaft)

FHWA – Федеральне управління автомобільних доріг США (Federal Highway Administration)

FL – штат Флорида, США (Florida)

GA – штат Джорджія, США (Georgia)

GH – картографічна онлайн-платформа для маршрутизації

GM – картографічна онлайн-платформа Google (Google Maps)

HECoS – Класифікація навчальних предметів у системі вищої освіти Великої Британії (Higher Education Classification of Subjects) (на заміну JACS)

HESA – Агентство статистики вищої освіти Великої Британії (Higher Education Statistics Agency)

HRK – Конференція ректорів університетів Німеччини (Hochschulrektorenkonferenz)

ID – штат Айдахо, США (Idaho)

IL – штат Іллінойс, США (Illinois)

IN – штат Індіана, США (Indiana)

ISO – Міжнародна організація зі стандартизації (International Organization for Standardization)

JACS – Спільна система академічного кодування у Великій Британії (Joint Academic Coding System) (використовувалась до 2019 року)

KY – штат Кентуккі, США (Kentucky)

LA – штат Луїзіана, США (Louisiana)

las2las – інструмент з набору LASTools для конвертації, фільтрації, трансформації координат або оптимізації .las/.laz файлів

LASTools – набір інструментів для обробки та аналізу даних лазерного сканування

LiDAR HD Maps – карти високої чіткості, побудовані на основі технології виявлення світла та визначення дальності (Light Detection and Ranging High-Definition Maps)

LMD-reform – Освітня реформа у Франції, яка впроваджує трирівневу структуру вищої освіти (Licence-Master-Doctorat)

MA – штат Массачусетс, США (Massachusetts)

MD – штат Меріленд, США (Maryland)

ME – штат Мейн, США (Maine)

MI – штат Мічиган, США (Michigan)

MN – штат Міннесота, США (Minnesota)

MT – штат Монтана, США (Montana)

NAD 27 – північноамериканська система геодезичних координат 1927 року

NAD 83 – північноамериканська система геодезичних координат 1983 року
(North American Datum 1983)

NC – штат Північна Кароліна, США (North Carolina)

NH – штат Нью-Гемпшир, США (New Hampshire)

NJ – штат Нью-Джерсі, США (New Jersey)

NM – штат Нью-Мексико, США (New Mexico)

Nomenclature GER – Французька номенклатура наукових галузей і дисциплін
(Nomenclature des domaines scientifiques en France)

NY – штат Нью-Йорк, США (New York)

OH – штат Огайо, США (Ohio)

OK – штат Оклахома, США (Oklahoma)

OR – штат Орегон, США (Oregon)

OpenStreetMap – відкритий картографічний проєкт (OSM)

OSM Standard – стандартний стиль відображення на OSM

PA – штат Пенсільванія, США (Pennsylvania)

PDAL – бібліотека для обробки та аналізу хмар точок (Point Data Abstraction Library)

QGIS – вільна геоінформаційна система з відкритим кодом для створення, редагування, аналізу та візуалізації просторових даних (Quantum GIS)

RI – штат Род-Айленд, США (Rhode Island)

RTK-GNSS – кінематичне позиціювання в реальному часі на основі глобальної навігаційної супутникової системи (Real-Time Kinematic – Global Navigation Satellite System)

SD – штат Південна Дакота, США (South Dakota)

SHS/ST panel – наукові панелі з гуманітарних та соціальних наук і природничо-технічних наук у Франції (Sciences Humaines et Sociales / Sciences et Technologies)

SRTM – радіолокаційна топографічна місія шатла (Shuttle Radar Topography Mission)

SWOT-аналіз – метод стратегічного аналізу, що оцінює **S**trengths (сильні сторони), **W**eaknesses (слабкі сторони), **O**pportunities (можливості) та **T**hreats (загрози) певного об'єкта, проекту або ситуації

TEN-T – Транс'європейські транспортні мережі (Trans-European Transport Network)

TN – штат Теннессі, США (Tennessee)

TX – штат Техас, США (Texas)

USGS – Геологічна служба США (United States Geological Survey)

VA – штат Вірджинія, США (Virginia)

WA – штат Вашингтон, США (Washington)

WGS 84 – глобальна геодезична система координат (World Geodetic System 1984)

WI – штат Вісконсін, США (Wisconsin)

WY – штат Вайомінг, США (Wyoming)

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Сучасна трансформація транспортної інфраструктури України відбувається на тлі двох взаємопов'язаних викликів: по-перше, необхідності інтегрувати країну у глобальні логістичні ланцюги та мережі TEN-T, а по-друге, термінової відбудови й модернізації доріг після масштабних руйнувань, спричинених воєнними діями. В обох випадках ключовою передумовою ефективного планування, проєктування та експлуатації автошляхів є метрично достовірна цифрова модель дорожньої мережі, здатна відображати реальну довжину, геометрію та природні – насамперед рельєфні – умови трас із точністю, прийнятною для техніко-економічних розрахунків, логістики, безпеки руху й екологічного моніторингу.

Західні країни вже перейшли до стандартизованого використання лазерного сканування, RTK-GNSS та цифрових моделей рельєфу (LiDAR HD Maps, Digital Twins) у дорожньому господарстві (Highways England, Autobahn GmbH, FHWA, тощо). В Україні ж подібні підходи запроваджуються фрагментарно: державною програмою «Велике будівництво» передбачено тривимірну зйомку лише окремих відрізків доріг, а більшість картографічних робіт спирається на застарілі топографічні плани або веб-карти, де похибки довжин сягають 0,2–0,6% у рівнинних районах і понад 2% – у гірських. Відсутність єдиної цифрової геодезичної основи зумовлює перевитрати пального, помилки в кошторисах і суперечливі дані у проєктній документації.

Особливо гостро проблема точності картографічного відображення доріг виявляється у регіональних та місцевих мережах, які становлять понад 80% загальної протяжності шляхів, але часто залишаються поза інноваційними проєктами через брак фінансів і методичних рекомендацій щодо інтеграції даних лазерного сканування та GNSS-вимірювання. Разом із тим саме ці дороги є критично важливими для гуманітарної логістики, аграрного експорту та швидкого реагування служб надзвичайних ситуацій.

Метою дослідження є розробка рекомендацій підвищення точності

картографічної візуалізації автомобільних шляхів України на основі аналізу їх просторово-часових структур.

Завдання дослідження:

1. Скласти детальний систематизований перелік просторових особливостей і проявів часових змін, що вже враховані або мають бути включені у процес картографічної візуалізації просторово-часових структур автомобільних шляхів.

2. Встановити ключові фактори, що найбільш суттєво впливають на точність картографічного та геоінформаційного моделювання просторово-часових структур лінійно-дорожніх ландшафтів.

3. Розробити алгоритм підвищення точності картографічної візуалізації автомобільних доріг шляхом оптимізації технології збору просторових даних на територіях з різним рельєфом

4. Провести SWOT-аналіз впровадження високоточних картографічних моделей для різних груп користувачів.

Об'єкт: просторово-часові структури автомобільних шляхів України

Предмет: природні, технологічні і організаційно-регуляторні фактори, що впливають на точність картографічної візуалізації просторово-часових структур автомобільних шляхів України.

Теоретико-методологічну основу дисертації становлять праці вітчизняних та зарубіжних фахівців у галузі картографії, геодезії, фотограмметрії, філософії, транспортної географії й просторового аналізу (Dron S., Hilgevoord J., Janiak A., Rodrigue J.-P., Sattler B., Zeyl D., Арсеньєвої Н. О., Денисика Г. І., Дудун Т. В., Карпінського Ю. О., Нефедової Н. Є., Пересадько В. А., Петліна В. М., Пугача С. О., Руденко Л. Г., Тітової С. В., Яцентюка Ю. В. та ін.). Методологічне підґрунтя ґрунтується на концепціях просторово-часового моделювання, мережевої топології та стандартах «digital twin» у транспортній інфраструктурі.

Методи дослідження. У роботі застосовано як загальнонаукові, так і спеціально-наукові методи.

До загальнонаукових, що використані в дисертаційному дослідженні відносяться методи:

- опису – для формування термінологічного апарату та характеристики природних і техногенних факторів, що впливають на відображення доріг;
- аналізу й синтезу – для систематизації сучасних підходів до інтеграції даних лазерного сканування, GNSS і ДЗЗ;
- узагальнення – для обґрунтування доцільності використання єдиної цифрової геодезичної основи;
- системного аналізу – для оцінки впливу природних, технологічних та організаційно-регуляторних факторів на точність довжин доріг;
- порівняння – для співставлення похибок між даними, отриманими за допомогою лазерного сканування, GNSS- та веб-картографічних платформ;
- графічний – для візуалізації профілів трас і результатів моделювання;
- математико-статистичний – для розрахунку СКП, t-критерію та регресійних моделей коригування довжин.

До спеціально наукових методів, що використані для виконання поставлених у дисертаційному дослідженні завдань відносяться:

- картографічний – для аналізу способів і методів візуалізації автомобільних доріг;
- GNSS-знімання (RTK/PPK), наземне й аеролідарне сканування – для побудови опорної мережі з точністю ± 1 см і формування хмар точок;
- мережевий аналіз у ГІС – для визначення щільності, зв'язності та центральності шляхів.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- статистично доведено систематичне заниження горизонтальних прокладень у популярних веб-картах порівняно з розрахунками, виконаними на основі даних лазерного сканування для різних орографічних умов;
- створено систематизований перелік просторових особливостей і проявів часових змін просторово-часових структур автомобільних шляхів з метою встановлення їх поточного врахування або майбутнього включення у процес картографічної візуалізації.

Удосконалено:

- методику інтеграції RTK-GNSS і лазерного сканування у єдину цифрову геодезичну основу для регіональних та локальних мереж автотранспортних шляхів;

- процедуру оцінювання впливу природних чинників на метричну точність, а також розширення поняття точності картографічної візуалізації.

Отримало подальший розвиток:

- підходи до оперативного оновлення цифрових дублікатів автомобільних доріг під час впливу різних факторів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Дослідження за темою дисертації проводилось впродовж 2016-2025 рр. відповідно до планів науково-дослідницьких робіт кафедри фізичної географії і картографії, міжнародних проєктів: Erasmus+ «INTENSE – Комплексна докторська школа з екологічної політики, менеджменту та техноекології» 586471-ERP-1-2017-1-EE-ERPKA2-CBHE-JP

Практичне значення отриманих результатів полягає у формуванні засад для високоточного картографування автомобільних доріг шляхом інтеграції даних лазерного сканування, що дозволить враховувати природні фактори – рельєф, гідрографію, кліматичні та погодні умови, рослинний покрив. Такий підхід забезпечує зниження похибки при розрахунку довжин доріг до $< 0,1\%$ і повноту картографічного відображення дорожньої обстановки. Результати дисертаційного дослідження використовуються в навчальному процесі факультету геології, географії, рекреації і туризму Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна в процесі викладання ряду освітніх компонент обов'язкового і вибіркового циклів, зокрема при підготовці лекцій та методичних матеріалів до лабораторних і практичних робіт з курсів першого («Топографія з основами геодезії», «Картографія»), другого («Геоіконіка») і третього («Теоретико-методичні засади в науках про Землю») освітніх рівнів.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною, завершеною науковою працею автора, у якій викладено результати власних досліджень із підвищення метричної точності картографічної візуалізації автомобільних доріг

шляхом інтеграції даних лазерного сканування з урахуванням природних чинників. Усі етапи роботи – від формування поняттєвого апарату і постановки гіпотез до польових вимірювань, лідарної та GNSS-зйомки, оброблення хмар точок, розроблення алгоритму підвищення точності картографічної візуалізації, статистичної оцінки похибок, валідації результатів і картографічної візуалізації – виконані здобувачем особисто. Автор самостійно здійснив порівняльний аналіз даних GM, OSM, GH з еталонними даними лазерного та геодезичного знімання; сформував базу контрольних GNSS-точок і провів їх камеральну обробку. Основні положення дисертації викладені у восьми наукових публікаціях п'ять – у фахових виданнях, три – у збірниках матеріалів міжнародних та всеукраїнських конференцій і апробовані на трьох міжнародних конференціях. У статтях, підготовлених у співавторстві, внесок здобувача стосувався збору та оброблення польових даних, розроблення алгоритмічного забезпечення й інтерпретації отриманих результатів. У дисертації використано результати інших дослідників із дотриманням принципів академічної доброчесності та з належним цитуванням першоджерел.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційного дослідження доповідались на Всеукраїнських та міжнародних конференціях:

- Міжнародна науково-практична конференція «Географічна наука та освіта: перспективи й інновації» 19-20 вересня 2024 року. Доповідь на тему «Нова гармонізація в освіті України - Старі проблеми».
- Всеукраїнські наукові Таліївські читання 25 жовтня 2024 року. Доповідь на тему «Картографічна освіта як один із інструментів вирішення екологічних проблем в Україні: сучасні виклики та перспективи».

Публікації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 7 наукових праць, з яких 2 у співавторстві, 5 статей у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України (категорія Б), опубліковано тези у матеріалах двох міжнародних і всеукраїнських конференцій, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі списку опублікованих праць, анотації, переліку умовних скорочень, вступу,

трьох розділів і висновків до них, списку використаних джерел (140 найменувань, з яких 96 – іноземних), загальних висновків. Загальний обсяг дисертації складає 229 сторінок друкованого тексту, у тому числі основна частина (вступ, три розділи і висновки) – 182 сторінки. Робота містить 59 рисунків і 63 таблиці.

РОЗДІЛ 1. ФІЛОСОФСЬКІ ПІДХОДИ ДО РОЗУМІННЯ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ СТРУКТУР В ПРИРОДНИЧИХ НАУКАХ

Природа – багатогранне поняття, яке сприймається та вивчається через призму спостережень, експериментів, інструментів і методів, і водночас виходить за межі виключно матеріального середовища. Природа як феномен конструюється у процесі взаємодії людини з довкіллям, а категорії простору та часу формують базове уявлення про неї. Ретроспективний погляд на еволюцію цих понять дозволяє простежити шлях набуття ними змісту через подолання обмежень і підтвердження припущень – від античного статичного простору через ньютонівську абсолютність до релятивістського чотиривимірного континууму. Вивчення природи та її компонентів сьогодні здійснюється шляхом моделювання її станів – від атомарного до космічного масштабу, причому основні вимоги до таких моделей – це точність, багатовимірність, а подекуди і динаміка. Для забезпечення цих вимог у дослідженнях природи, зокрема ландшафтів, і особливо лінійно-дорожніх ландшафтів як складових геосистем, доцільно розглядати їх як симбіотичні системи із просторовими характеристиками і часовими особливостями. У цьому контексті філософські підходи до розуміння простору й часу у їх поєднанні створюють підґрунтя для розгляду об'єктів і явищ як просторово-часових структур. Відтак з'являється можливість класифікувати та інтерпретувати ці структури для потреб картографічного й геоінформаційного моделювання.

1.1 Еволюція підходів до поняття простору

Значення простору як фундаментальної категорії людського пізнання розкривалося поступово – від міфологічних уявлень до перших філософських узагальнень. Поняття простору виникло в античній філософії як спроба пояснити структуру Всесвіту та місце об'єктів у ньому. Б. Саттлер у своїй роботі розглядає розвиток цього поняття в античну добу, зазначаючи, що Гесіод та Анаксимандр ще не чітко розрізняли простір від часу чи матерії. Перший чіткий розподіл провели атомісти Левкіпп і Демокріт, які ввели поняття

порожнечі (κενόν) – нескінченного, гомогенного та ізотропного середовища, необхідного для руху атомів. Саме ці філософські ідеї стали основою для формування перших картографічних концепцій, де простір розглядався як статичний фон, необхідний для відображення розташування об'єктів, але ще без урахування часу як фактора змін. Вони визначили простір як умову існування множинності тіл та їх руху, але він був позбавлений внутрішньої структури та не впливав безпосередньо на рух тіл [91].

Платон у діалозі «Тімей» ввів поняття *khôra* – «простору», що є пасивним материнським началом, місцем для появи та втілення речей чуттєвого світу. Простір для Платона є аморфним, нествореним вмістилищем, яке не має власних метричних характеристик, але завдяки взаємодії з чітко структурованими елементами (вогнем, повітрям, водою, землею) формує звичний людський простір з визначеними параметрами розміру, форми та дистанції [109].

Аристотель у своїй праці «Фізика» трактував простір (*topos*) як першу нерухому межу навколишнього тіла, що визначає положення та рух інших тіл., тобто простір є фізичним контекстом, неперервним середовищем, що забезпечує неперервність руху. Він увів поняття «природних місць», що дозволяє забезпечити об'єктивну орієнтацію тіл у Всесвіті, заперечуючи існування абсолютної порожнечі за межами космосу [91; 109].

У філософії Прокла, як зазначає М. Мартейн, простір трактується як «світлова матерія», створена Світовою душею, що виступає необхідною умовою для створення та реалізації геометричних конструкцій через уяву (*phantasia*). Простір тут є активним елементом, що забезпечує можливість тривимірних форм і фігур [78].

У Середньовіччі схоластика здебільшого дотримувалася аристотелівського уявлення простору як заповненого місця. Е.- Д. Сілла описував трансформацію поняття *spatium* у XIV ст., коли Н. Орезм припустив можливість існування уявного простору (*vacuum*), демонструючи, що простір міг мати онтологічний статус незалежно від тілесних об'єктів, хоч і як уявна конструкція. Ця ідея стала перехідним етапом до модерного уявлення про простір [99].

В епоху Відродження з'явилися концепції нескінченного простору Всесвіту, зокрема у працях Дж. Бруно та М. Кузанського, що підготували ґрунт для наукових революцій XVII століття. Е. Джаніак дослідив цей перехід, наголошуючи на тому, що у першій половині XVII ст. домінувала традиція Р. Декарта та Т. Гоббса, де простір не відділявся від тілесної субстанції. Проте після 70-х років XVII століття, завдяки І. Ньютону, відбулася кардинальна зміна – було введено поняття абсолютного простору, що існує незалежно від тілесних об'єктів. Ця концепція, разом із реляційним підходом Г. Лейбніца, стала ключовою у подальших наукових і філософських дискусіях [89; 98]. Ця дискусія стала фундаментом для сучасної картографії, яка постійно балансує між абсолютним та реляційним підходами при моделюванні просторових явищ.

У XVIII ст. виникли дві філософські традиції: емпірична, представлена Дж. Локком, який вважав простір результатом чуттєвого досвіду, та раціоналістична, представлена І. Кантом, який визначав простір як апіорну форму інтуїції, необхідну умову можливості будь-якого сприйняття. І. Кант підкреслював, що простір є суб'єктивною формою упорядкування досвіду, яка існує незалежно від зовнішніх речей [72; 89; 96].

Наприкінці XIX – початку XX ст. математичні та фізичні концепції простору суттєво розширилися завдяки неевклідовим геометріям М. Лобачевського, Я. Бояї, К. Гаусса і А. Пуанкаре, які наголошували на умовності геометричних структур. Теорія відносності А. Ейнштейна впровадила поняття простору-часу, динамічно пов'язаного з матерією та енергією [19; 42; 51; 60; 79].

Сучасний етап характеризується можливістю вивчення простору від найбільш абстрактних математичних конструкцій до конкретних когнітивних моделей (внутрішні просторові репрезентації мозку). Зростаючий науково-технічний прогрес дозволяє поглиблювати аналіз як на вищих (узагальнених, глобальних), так і на базових (елементарних) рівнях організації, роблячи простір багатомасштабною, інтегративною категорією сучасної науки.

Серед природничих наук системне вивчення простору як наукової категорії започаткувала фізика. Фізичний простір у класичній фізиці є

тривимірною евклідовою ареною подій [94], необмеженою протяжністю над землею [3], що слугувала абсолютною системою координат за Ньютоном [89]. Із розвитком теорії відносності відбувся перехід до більш узагальненого рівня аналізу: простір було об'єднано з часом у чотиривимірний простір-час Мінковського, який у загальній теорії динамічно викривляється під дією мас [19; 51]. Експерименти, зокрема відхилення променів світла поблизу Сонця, показали перевагу неевклідових моделей простору [48]. Сучасна космологія розглядає простір як динамічний компонент розширюваного Всесвіту, який за останні 14 млрд років значно розширився [73]. На квантовому рівні деталізації простір набуває ймовірнісного характеру, де класичні точки замінюються розподілами ймовірностей [63]. Водночас «простір» у квантовій теорії є гільбертовим простором станів системи, де навіть вакуум розглядається як стан, заповнений квантовими флуктуаціями [62]. На фундаментальних планківських масштабах можливий перехід до квантованого простору-часу, де континуум набуває дискретної структури [45]. Ці концепції показують, що сучасний фізичний простір аналізується на багатьох рівнях від мікро- до макромасштабів, що забезпечується високим рівнем науково-технічного прогресу.

В математиці зміст поняття простору пройшов шлях від тривимірного простору Евкліда до складніших багатовимірних просторів, таких як многовиди Рімана. Розвиток топології призвів до узагальнення поняття простору як множини з визначеними відкритими множинами, що задають близькість і неперервність точок [58]. Сьогодні математика оперує різними типами абстрактних просторів, які зберігають певні спільні риси з фізичним простором через використання понять «відстані», «сусідства», тощо, але вони уявляються абстрактними математичними моделями.

Реальний простір же досліджується не як однорідна абстракція, а як система функціонально взаємопов'язаних компонентів. Навколишній простір характеризується неоднорідністю ресурсів, різними фазами та ступенем освоєння територій, що формує багаторівневу структуру геосистем. Наприклад, геологічний простір визначається тривимірною структурою земних надр, що формується у геохронологічних масштабах [17]. Геологія використовує

ієрархічний підхід, аналізуючи як дрібні компоненти (пласти, тріщини), так і великі структури (платформи, розломи, тектонічні плити), що змінюються динамічно у просторі та часі [50]. Сучасні технології дозволяють створювати детальні тривимірні моделі геологічних структур, які відображають їх складну геометрію.

Географічний простір у сучасній науці трактується як інтегральна категорія, що охоплює розташування та взаємодію об'єктів на поверхні Землі. За визначенням С. Пугача, географічний простір представляє собою впорядковану систему об'єктів та всіх зв'язків між ними, створюючи нову якість, яка виникає завдяки взаємодії елементів [33]. Він характеризується неперервністю земної поверхні, дискретністю місць і регіонів, криволінійною геодезичною метрикою та вертикальною структурою (висота та глибина). Існують субстанційний та реляційний підходи до його розуміння, які відповідають концепціям І. Ньютона і Г. Лейбніца відповідно [33].

Фізична географія та ландшафтознавство вивчають простір як багатовимірну інтегральну структуру, що включає геологічні, кліматичні, гідрологічні, біотичні й антропогенні фактори. Простір розглядається як «поле» взаємодій, де кожен чинник є координатною віссю концептуального простору. В. М. Петлін наголошував на просторово-часовій багатовимірності, де різномасштабні чинники мають власні часові інтервали й режими впливу на ландшафти [24].

Картографічний простір відображає змодельоване взаємне розміщення та зміни природних і суспільних явищ через системи проєкцій, базуючись на геодезичних даних та даних ДЗЗ. Закономірно визначати картографічний простір як конкретний порядок розміщення і часових змін явищ, оскільки картографія найтісніше пов'язана з геодезією та геоінформатикою, які забезпечують отримання точних координат об'єктів і створюють підґрунтя для аналізу їх просторових закономірностей [56]. Сучасні ГІС дозволяють деталізовано моделювати просторові кластери, проводити просторовий аналіз і створювати електронні дублікати земної поверхні з високою точністю із похибками в межах тисячних часток міліметра. Це забезпечує перехід до нових

рівнів деталізації і масштабування геосистем та їх компонентів, вимагаючи постійного перегляду методологічних основ картографії та географічного аналізу. Особливо це актуально у дослідженнях автомобільних шляхів, де просторово-часові структури дозволяють враховувати не лише статичні параметри, як протяжність і конфігурацію, але й динамічні характеристики, зокрема зміни дорожнього полотна, сезонність та зміну інтенсивності руху транспорту. Це сприяє точнішому моделюванню доріг та ефективнішому їх використанню.

1.2 Еволюція підходів до поняття часу

Час є фундаментальною категорією, яка пов'язує природні та суспільні явища. У Великому тлумачному словнику сучасної української мови час визначається як тривалість буття явищ, які мають прояви у філософії, мистецтві, спорті, астрономії, а також у формі історичних періодів [3]. Еволюція поняття «час» пройшла тисячоліття і ще триває.

Антична філософія запропонувала перші систематичні пояснення природи часу. У роботі Б. Саттлер простежено розвиток поняття від найдавніших джерел до Арістотеля. Зазначено, що у Гесіода та Анаксимандра час не був чітко відокремлений від простору. Наприклад, у Гесіода часові відрізки вимірювалися просторовими одиницями, як шлях падіння ковадла, а просторові поняття набували часових характеристик, наприклад, ніч як просторове оточення. Анаксимандр запропонував поняття *apeiron* або «безмежне», яке охоплює просторову й часову нескінченність. Час у його розумінні – це необмежений процес появи і зникнення речей. Зенон Елейський сформулював проблему розуміння часу у контексті руху через так званий «парадокс бігуна», де час виключався з аналізу руху на користь простору. Арістотель критикував цю позицію, встановлюючи взаємозв'язок простору і часу в процесі руху [91].

Платон у праці «Тімей» описав час як незалежну величину, створену Деміургом для структурованості світу. На відміну від простору, який він уявляв хаотичним, час створений для пізнаваності та впорядкованості. Платон

розумів час, як рухомий образ у вічності, що підкреслювало циклічність космічних процесів та зв'язок із рухом небесних тіл [109].

С. Дрон зазначав, що Арістотель в роботі «Фізика» визначав час як число або міру руху щодо «перед» і «після». За Арістотелем час невіддільний від змін, а відлік часу здійснюється через послідовність подій, де «тепер» є межею між минулим і майбутнім [52]. Б. Саттлер вказувала, що Арістотель чітко розмежував час і простір. Для нього простір важливий лише для пояснення руху, тоді як час є універсальною категорією, яка охоплює всі процеси змін. Арістотель запровадив поняття континууму, яке дозволило йому відповісти на парадокси Зенона, доводячи, що нескінченна кількість просторових частин може бути подолана у скінченний час [91].

У середньовічній філософії акцент змістився на лінійність і скінченність часу. Августин Блаженний писав, що час створений Богом разом зі світом, тому не існувало ніякого «раніше», доки не було створено час [1]. Він розмежував вічність Бога, як позачасове буття, та створений час світу, а також підкреслив психологічне сприйняття часу, де минуле існує в пам'яті, теперішнє пізнається через сприйняття, а майбутнє у стані очікування. Цю ідею розвивали схоласти Боецій, Тома Аквінський, поєднуючи арістотелівське визначення часу з християнським вченням про творіння світу та вічність.

М. Мартейн вказувала, що у Прокла поняття часу розглядалося опосередковано через уможливлений простір як аналог вічності. Хоча Прокл критикував таку аналогію, вона дозволяла зрозуміти, як мислення проєктує просторово-часові форми через уяву [78].

У статті Е. Д. Сілла описано погляди Н. Орезма, для якого час – це тривалість, виміряна рухом небесних сфер. Він також увів ідею «часу Бога» – нескінченної вічності, яка не поділяється на миті. Таким чином, середньовічні автори намагалися поєднати фізичне поняття часу з теологічним, вводячи умовні концепції [99].

Після епохи Середньовіччя у новоєвропейській науці утвердилося ньютонівське уявлення часу як абсолютного та універсального. І. Ньютон у праці «Mathematical Principles of Natural Philosophy» увів поняття

абсолютного часу, що сам собою рівномірно тече незалежно від зовнішніх умов [81]. Г. Лейбніц, натомість, вважав час лише відносною послідовністю подій, заперечуючи його самостійне буття [76]. Попри дискусію Ньютона-Лейбніца, класична механіка закріпила ньютонівську модель однорідного часу, що є однаковим для всіх спостерігачів. Е. Джаніак зазначав, що хоча дискусії І. Ньютона і Г. Лейбніца про абсолютність або реляційність часу мали значення, справжня радикальна трансформація поняття часу сталася лише у ХХ ст. з появою теорії відносності А. Ейнштейна [98].

До ХХ ст. домінувало абсолютне розуміння часу, яке було переглянуто А. Ейнштейном у спеціальній теорії відносності, де час перестав бути незалежним від простору і став частиною єдиного простору-часу. Тривалість подій стала залежати від руху спостерігача і гравітації [53].

Свого часу Я. Хільгеворд наголошував, що у квантовій механіці час є зовнішнім параметром, тоді як у загальній теорії відносності – динамічною координатою, що створює суперечність у трактуванні природи часу [61]. Д. Ріклз припускав, що на фундаментальному рівні простір-час може не бути безперервною класичною структурою, а виникати як усереднена властивість квантових процесів [86]. Сучасна наука продовжує пошук єдиного розуміння часу.

Кожен історичний період характеризується поступовим переходом на більші масштаби дослідження та глибшу деталізацію поняття часу. Якщо античність та середньовіччя переважно використовували просторові аналогії і базові фізичні явища, то новоевропейський період запропонував універсальний абсолютний вимір часу, дозволяючи узагальнювати фізичні події. Наступні періоди почали враховувати умовність та відносність, залучаючи більш складні, гібридні й умовні моделі.

Сучасні дослідження часу охоплюють два основні напрямки: мікромасштабні дослідження, які вивчають фундаментальні взаємодії на рівні елементарних частинок, та гіпермасштабні дослідження, які аналізують поведінку великих систем, космічних масштабів і еволюцію Всесвіту, що є результатом загального історичного розвитку наукового пізнання часу.

У фізиці час є базовою величиною, яка входить до всіх динамічних законів і досліджується на різних рівнях ієрархії – від макроскопічного до квантового. Н. Ешбі описує експерименти з атомними годинниками, які демонструють, що на поверхні Землі час пливе повільніше у порівнянні з плином часу на орбіті. Саме ці ефекти є компонентами точного моделювання в системах GPS [43].

У математиці час виконує функцію незалежної змінної у диференціальних рівняннях, що формалізують зміну станів у часі. Це дозволяє моделювати динаміку в системах різної природи на рівні окремих елементів [38].

У геології час розглядається у масштабах мільйонів і мільярдів років. Ще в XVIII ст. Дж. Гаттон зазначав, що початок геологічної історії не спостерігається, як і її кінець, що вказує на практично безмежну тривалість геологічних процесів [64; 65]. Міжнародна хроностратиграфічна шкала представляє ієрархію часових інтервалів: еони, ери, періоди, епохи – сформовані на основі стратиграфічних меж і підтверджені радіометричним датуванням [66]. Це дозволяє оперувати базовими і узагальненими рівнями часової організації з однаковою легкістю. У XX ст. на тлі прогресу в галузі радіоактивного аналізу виникли точні методи визначення абсолютного віку порід, завдяки яким встановлено вік Землі (приблизно 4,54 млрд років), а також часові межі геологічних подій [84]. Такі дані формують основу масштабованих моделей еволюції Землі, де кожен хронологічний компонент узгоджений з просторовими структурами геологічного середовища.

У науках про Землю поняття часу є центральним для аналізу розвитку ландшафтів, кліматичних змін та просторових процесів. В багатьох випадках час асоціюється із повторюваними астрономічними циклами, системою часових поясів. Проте при детальному вивченні геосистем часовий аспект розкриває нові можливості для аналізу їхніх станів. В. М. Петлін розглядає час через множинність ритмів територіальних систем від нано- до багаторічних ритмів, систематизуючи їх у часовій ієрархії. Він вводить такі поняття, як «контактний час», «час перебудови», «час реакції» та «час

релаксації», які відображають різномасштабні взаємодії у геосистемах. В. М. Петлін також визначає часові горизонти прогнозування, від оперативних до довгострокових, підкреслюючи роль масштабування та деталізації для глибшого аналізу [23, 25].

У географії особливо вирізняється часова географія (time-geography), започаткована Торстеном Гегерстрандом. Вона аналізує рух людей та матеріальних об'єктів у єдиному просторі-часі через поняття просторово-часових шляхів. Ця методологія враховує паралельно просторові та часові обмеження на діяльність [57]. Сучасні ГІС-технології розширюють можливості аналізу просторово-часових даних, забезпечуючи детальне відстеження процесів та явищ у масштабах від місцевих до глобальних [100].

Особливе місце час займає в картографії. На картах різних епох об'єкти фіксуються з точністю та детальністю, напряду пов'язану із результатами науково-технічного прогресу відповідного періоду. Початкова ціль фіксації стану простору у певний час на карті – це забезпечити найдовший можливий період актуальності, поки зберігається відповідність графічних образів на карті орієнтирам на маршруті в реальності. Прискорення змін навколишнього середовища спонукало до постійного зменшення періодів випуску оновлених карт задля забезпечення актуальності картографічної інформації. Наразі оновлення просторової інформації та її візуалізація за допомогою сучасних інтерактивних багатовимірних моделей з анімацією для потреб окремих галузей відбувається щосекунди. На основі банків просторових даних розробляють прогнози майбутніх змін станів геосистем.

У всіх науках, зокрема природничого спрямування, час є однією з ключових категорій, що дозволяє впорядковувати явища, встановлювати причинно-наслідкові зв'язки та характеризувати темпи змін. Хоча кожна галузь науки використовує різні масштаби та рівні деталізації часових процесів, саме міждисциплінарна інтеграція цих підходів відкриває більш широкі можливості для пізнання складних систем.

1.3 Особливості формування сутності просторово-часових структур в науках про Землю

Вивчення простору і часу як цілого створює можливість побачити динаміку змін станів системи. Задля створення можливості вивчати системи на різних ієрархічних рівнях ми представили їх як суму складних компонентів. Кожен компонент системи ми ототожнюємо із поняттям «структура», що за одним із значень у тлумачному словнику розуміють як взаєморозміщення та взаємозв'язок складових частин цілого [3, с. 1405].

Підходити до вивчення просторово-часових структур доцільно через вивчення їх станів у різних проміжках часу. Задля аналізу динаміки доцільно обирати часові інтервали від доби до років. Збільшуючи інтервал до десятиліть можна встановити, чи виникають нові структури, чи змінюються стани і взаємозв'язки між наявними структурами. На інтервалах від десятиліть до тисячоліть можливо простежити довготривала еволюція або деградація на різних рівнях. Вивчення просторово-часових структур у різні проміжки часу забезпечують цілісне розуміння явищ, від миттєвих катастрофічних подій до тривалих геологічних, кліматичних чи соціально-економічних процесів. Також це відкриває додаткові можливості для прогнозування та планування розвитку територій.

Загалом не зустрічається інформації про представлення навколишнього середовища як набору просторово-часових структур до XVII століття. Пояснення природи станів або процесів у навколишньому середовищі відбувалось через встановлення взаємозалежності компонентів простору і часу, які не були чітко відокремлені. У ранній античності згідно з баченнями Гесіода і Анаксимандра простір і час існували як інтегральне поняття у рамках єдиної концепції апейрону. Зенон Елейський проблематизував взаємозалежність простору і часу через парадокси руху. У Платона простір і час мають самостійний онтологічний статус, але роздуми про їх інтеграцію не зустрічаються [91]. Арістотель систематично поєднав простір і час у понятті континууму, розуміючи їх як взаємопов'язані, хоча й незалежні величини, що

можна вважати основою для роздумів про просторові особливості та часову динаміку явищ, що спостерігаються [26; 91].

У Середньовіччі філософи поєднують конкретно-реляційний просторовий підхід Арістотеля з лінійним, теологічно орієнтованим часом у схоластів. Н. Орезм і його сучасники розглядали взаємодію просторових і часових аспектів без прямого зазначення їх змісту та чіткого однозначного формулювання поняття [99]. Новий крок зробив І. Ньютон, увівши поняття абсолютного простору й часу, що сформувало базис класичної механіки і підштовхнуло сучасників до полеміки щодо їх ієрархічного поділу. Його опонент Г. Лейбніц запропонував реляційну модель, яка трактувала простір і час як системи відношень між об'єктами [76]. І. Кант переніс дискусію у сферу суб'єктивного сприйняття, визначаючи простір і час як апіорні форми чуттєвості, необхідні для впорядкування досвіду. У цьому контексті вони розглядаються в зовсім новому вимірі та постають як нова, раніше невідома структура [96].

На початку XX століття закладаються основи для формування поняття просторово-часових структур, що отримало революційний розвиток завдяки роботам Г. Мінковського та А. Ейнштейна. Г. Мінковський запропонував геометричну модель чотиривимірного континууму, в якій простір і час розглядаються як єдина структура, коли А. Ейнштейн у межах загальної теорії відносності довів, що цей простір-час є динамічним, викривленим полем, яке взаємодіє з масою та енергією [79; 80]. Подальші філософські й наукові дискусії змістилися до реляційного розуміння простору-часу, розглядаючи його не як контейнер для подій, а як динамічну структуру, визначену відносинами між об'єктами і процесами.

У сучасній науці просторово-часові структури аналізуються з різним ступенем деталізації, що стало можливим завдяки досягненням науково-технічного прогресу. Новітні математичні та комп'ютерні методи дозволяють вивчати ці структури як на мікрорівні, в аспекті детальної взаємодії елементів, так і на макро- та мегарівнях для аналізу систем вищого порядку. Формалізовані методи опису дозволяють проводити аналіз просторово-часових структур дедалі

точнішим і ефективнішим способом, забезпечуючи інтеграцію емпіричного досвіду й теоретичних моделей для прогнозування і планування.

У фізиці просторово-часові структури конкретизовано найбільше завдяки спеціальній та загальній теоріям відносності. Згідно з ними будь-яка подія описується чотирма координатами, що трансформуються за законами Лоренца. Простір-час став динамічною структурою, яка взаємодіє з матерією, а гравітація розуміється як прояв викривлення простору-часу поблизу масивних об'єктів [53; 83]. Реальність структури динамічного простору-часу підтверджена відкриттям гравітаційних хвиль у 2015 році [92].

У математиці просторово-часові структури розглядаються абстрактно через строгі визначення геометрії та топології. Важливим етапом стало створення чотиривимірної геометрії Г. Мінковського, яка стала математичним фундаментом сучасної фізики. Математика забезпечує структурний опис властивостей просторів будь-якої розмірності та складності, що слугує основою для багатьох міждисциплінарних досліджень і дає змогу подальшої декомпозиції простору-часу на структурні елементи.

У науках про Землю просторово-часові структури вивчаються в конкретних прикладних контекстах, моделюючи просторово-часові структури геосистем. Часо-географія Т. Гегерстранда моделює траєкторії людей, об'єктів чи інформації у 4-вимірному континуумі [57]. У фізичній географії та геології просторово-часові структури охоплюють процеси та стани геосистем, які характеризуються широкою варіативністю часових масштабів [107]. В українській науці представники ландшафтознавства і геосистемного підходу певний час розробляють основи для концепції ПЧС. В. М. Петлін описував складні системи, де просторові елементи тісно пов'язані з динамікою змін, вводячи поняття інваріанта як стійкого ядра територіальних систем [23]. Ю. В. Яцентюк аналізував динамічні мережі, що ми також ототожнюємо із ПЧС, які постійно взаємодіють з природними умовами [41].

Картографія вивчає об'єкти і явища, їх просторові особливості та часові зміни шляхом моделювання та візуалізації ПЧС. Історично це реалізовувалось у серіях карт, зокрема різночасових, атласах, окремих картах територій та подій. З

розвитком ГІС виникли комплексні багатовимірні анімовані моделі різної детальності, які дозволяють відслідковувати зміни станів складових геосистем та їх структур на основі цих моделей, враховуючи множини їх зв'язків [54].

Поняття «*простір*» у нашому розумінні – це певний порядок взаємного розміщення природних і суспільних об'єктів та явищ, що характеризується як статичними параметрами (конфігурація, розподіл), так і динамічними властивостями, які змінюються у часі під впливом природних та антропогенних факторів, де між його елементами відбувається обмін речовиною, енергією та інформацією.

Вимір – це незалежний параметр, який описує положення або характеристику об'єкта чи явища у просторі і часі.

Система – це сукупність взаємопов'язаних елементів і процесів, що взаємодіють за певними законами, утворюючи цілісний комплекс зі специфічними функціями і властивостями.

Просторово-часова структура – це динамічна систему у просторі, що змінюється протягом часу під впливом природних і антропогенних факторів. Вивчення просторово-часових структур на різних ієрархічних рівнях може розкривати додаткові аспекти, що дозволять краще зрозуміти складні взаємодії у природі та суспільстві.

Відповідно, точність ми трактуємо не лише у вузькому значенні геометричної чи граничної графічної точності, а й як параметр, що поєднує в собі компоненти актуальності, достовірності та повноти. Тобто точність – це не лише просторове відображення локалізації об'єкта, процесу чи явища, а й поняття сучасності, оперативності й своєчасності, тобто точності відображення навколишнього середовища в часі. Іншими словами, точність – один із ключових показників картографічної візуалізації ПЧС.

1.3.1 Особливості і проблеми візуалізації автомобільних шляхів як складних ПЧС

На нашу думку, однією із репрезентативних ПЧС є транспортна мережа, яка виступає базовою структурою для ПЧС автомобільних шляхів. В цьому

контексті ПЧС автомобільних шляхів успадковує частину просторових особливостей та часових змін ПЧС транспортної мережі.

У подальшому тексті термін «автомобільний шлях» вживаємо як синонім «автомобільної дороги», хоча сама форма «шлях» у цьому сполученні рідко фіксується у словниках. Поняття «шлях» історично охоплювало не лише смугу пересування, а й прилеглу територію, де дорога виступає лінійно-ландшафтним елементом, що взаємодіє з природними компонентами. Функціональне наповнення цього терміна підтверджується енциклопедичними джерелами. В *Енциклопедії Сучасної України* дороги визначено як «шляхи сполучення для руху людей та транспорту», серед яких безрейкові – автомобільні дороги – формують шляхову мережу країни [40]. *Географічна енциклопедія України* уточнює, що автомобільна дорога є інженерною спорудою, яка використовується для руху автомобільного транспорту, і до складу якої входять земляне полотно, проїзна частина, узбіччя та штучні споруди; більшість таких доріг в Україні має тверде покриття, а активна їх розбудова припала на 1970-1980-ті роки [4]. Таким чином, у нашому дослідженні поняття «автомобільний шлях / дорога» охоплює не лише конструктивно-інженерний об'єкт, а й прилеглий ландшафт – як природний, так і антропогенно змінений. У сукупності вони формують просторово-часову структуру, придатну для картографічного та геоінформаційного моделювання..

У контексті картографічного та геоінформаційного моделювання і візуалізації автомобільних шляхів постає потреба в деталізованому відображенні їхньої структури, оскільки за традиційними підходами їх зображення спрощується до лінійних об'єктів.

Ми пропонуємо розглядати множину просторово-часових структур автомобільних шляхів та їх елементів як систематизований деталізований ієрархічний перелік. Використовуючи такий підхід доцільно сформувати перелік компонентів, що часто залишаються поза увагою у межах класичних картографічних моделей автомобільних шляхів, через що знижується інформативність і точність їх картографічної візуалізації.

У такому розумінні автомобільні шляхи постають не ізольованим об'єктом моделювання, а складовою ширшої транспортної системи, в якій вони взаємодіють з іншими видами інфраструктури.

Автомобільні транспортні мережі є частиною транспортних мереж, що є об'єктом дослідження географії транспорту. Ж.-П. Родріге визначав транспортну мережу як систему шляхів сполучення, що з'єднують вузлові точки на території, забезпечуючи переміщення людей і вантажів у просторі [87]. Ж.-П. Родріге визначав просторовий аспект транспортних мереж як характеристику мережевого покриття, що відображає щільність, ступінь охоплення території шляхами, а також морфологічні особливості їхнього просторового розміщення. Це включає аналіз просторової організації транспортної інфраструктури за критеріями повноти покриття регіону та формування типових структур – радіальної, сітчастої, лінійної тощо [87].

У багатьох країнах світу ключові міста з'єднані мережами магістралей у формі «*hub-and-spoke*» на зразок спиць колеса – така центрипетальна мережа має один чи кілька домінуючих центрів та вузлів з найвищим ступенем з'єднаності. Для протилежного типу – центрифугальної мережі – характерна відсутність вираженого центру і більш рівномірна, сітчаста форма з'єднань [87].

Транспортні мережі відіграють ключову роль у формуванні територіальної структури регіонів, забезпечуючи економічні та соціальні взаємозв'язки [87]. Їх мережеве покриття кількісно характеризується геометричними параметрами – довжиною шляхів, щільністю в межах певної площі або відносно кількості населення. Високі показники транспортної забезпеченості, зокрема щільності доріг і залізничних колій, зазвичай корелюють із рівнем економічного розвитку території. Не менш важливим параметром є зв'язність мережі, яка відображає наявність альтернативних маршрутів між пунктами та визначає ступінь доступності об'єктів, а також стійкість сполучень у разі розриву окремих ланок [87].

Географічна конфігурація транспортної мережі формується під впливом природних умов і історичних чинників. Сучасні автомобільні шляхи нерідко

проходять вздовж давніх торговельних маршрутів або залізниць XIX ст., сформованих із урахуванням соціально-економічної та політичної доцільності свого часу. Як наслідок, зберігається просторова інерція мережі, що проявляється у стабільному розташуванні ключових магістралей і вузлів, орієнтованих на колишні або теперішні центри економічної активності [34]. Водночас будівництво нових доріг передбачає баланс між необхідністю з'єднання максимальної кількості населених пунктів і прагненням уникати складних для інженерного освоєння територій – надмірно пересіченої місцевості, крутих схилів, водних перешкод. Подолання таких природних бар'єрів підвищує рельєфну складність трас, що напряду впливає на їхню довжину, витрати на будівництво та експлуатаційні характеристики [87].

Окремі дослідження зосереджуються на врахуванні фізико-географічних умов при проектуванні транспортних шляхів. Зокрема, обґрунтовано застосування багатofакторного ГІС-аналізу для оптимізації планування лісових доріг у гірських районах. У таких підходах враховуються дані про рельєф (крутість схилів, експозицію, абсолютні висоти), гідрографічну мережу, ґрунтовий покрив, геологічну будову та зсувонебезпечність територій. Кожному фактору надається вагове значення для побудови карти придатності; пріоритет надається ділянкам зі схилами менше 45% і стабільними ґрунтами. У результаті трасування здійснюється переважно в зонах з найменшими геоморфологічними обмеженнями, тоді як надмірно круті або заболочені ділянки виключаються [46]. Врахування ландшафтних умов при виборі траси розглядається як ключовий етап проектування, про що свідчать, зокрема, практичні рекомендації британських інженерів, розроблені у 80-х роках XX століття [44]. Застосування сучасних ГІС-технологій забезпечує інтеграцію різнорідних факторів в єдину аналітичну модель з високим ступенем просторової деталізації.

Такі природні фактори як рельєф, рослинність, гідрографія, кліматичні умови суттєво впливають на конфігурацію та функціональність дорожньої мережі, а їх ігнорування в картографічних моделях може спотворити просторову реальність. Так, помилки в урахуванні **рельєфу** здатні призвести до

хибного уявлення про доступність певної місцевості. Відсутність на карті дрібних доріг у гірських районах може спотворювати оцінку ізольованості населених пунктів. **Рослинність**, зокрема густі ліси або заболочені зарості, впливає на прохідність території та доцільність прокладання доріг окремими ділянками. Густота **гідрографічної** мережі впливає на кількість необхідних інженерних споруд і ступінь розчленованості транспортної мережі, а відсутність відображення мостів, гребель або паводконебезпечних зон унеможливорює коректне логістичне планування. **Кліматичні** та погодні умови, як чинники, зокрема проявляючись снігопадами, паводками провокують період сезонного бездоріжжя, впливають на прохідність окремих ділянок мережі. Їх неврахування при картографуванні може призвести до хибного уявлення про доступність території в різні періоди року. Таким чином, висока точність та актуальність ландшафтного компоненту у візуалізації ПЧС є передумовою ефективного планування, аналізу та використання транспортної інфраструктури.

Візуалізація ПЧС мережі автомобільних шляхів повинна підкреслювати вплив природних факторів. Сучасні ГІС дають змогу накладати шари рельєфу, гідрографічної мережі, кліматичних та природних умов на шар транспортної мережі, тим самим наочно показуючи взаємозв'язки. Проте точність такої візуалізації напряду залежить від якості просторових даних. У разі використання застарілих чи надто узагальнених картографічних основ можливі суттєві похибки. Так Е.Гакстаттер зазначав, що оцифровані топографічні карти масштабу 1:24 000 для території США були прив'язані до старого геодезичного датуму NAD 27, через що положення об'єктів на них було зміщене на сотні футів від реальних координат. У результаті, коли високоточні GPS-дані наклали на таку карту, полігони доріг не збігались із відведеними під дороги смугами, що спричинило помилки у просторовому позиціонуванні [59].

При сучасному картографуванні мереж застосовують високоточні джерела – супутникові знімки, GPS-зйомку, дані дистанційного зондування та лазерного сканування. Зокрема, мобільні лазерні сканери, встановлені на автомобілях, здатні безпечно і швидко збирати дуже щільні хмари точок місцевості прямо під

час руху. Як зазначено в роботі корейських вчених, отримані таким чином цифрові моделі рельєфу і дорожньої інфраструктури мають високу роздільну здатність із похибкою вимірів близько 1–3 см на 50 м і дозволяють детально відобразити всі елементи просторової структури – від ширини проїзної частини до крутизни узбіч уздовж траси [74]. Врахування таких деталей на картах значно підвищує їх точність. Наприклад, використання лазерних сканерів при створенні карт автомобільних шляхів у гірських районах дає змогу точно передати звивистість серпантинів та крутість схилів, що було б важко досягти традиційними методами. Таким чином, сучасні технології (наприклад, лазерне сканування) відкривають нові можливості для картографічного відтворення просторового аспекту транспортних мереж з безпрецедентною точністю і повнотою.

ПЧС транспортних мереж також притаманний часовий аспект, що проявляється у динаміці змін, режимі функціонування, сезонності тощо.

Часові особливості, зокрема динаміка змін, проявляються у розвитку мережі, відбувається поступово і носить нерівномірний характер – періоди швидкого розростання інфраструктури змінюються періодами стабілізації або навіть деградації деяких ділянок [87]. В роботі С. Пугача зазначається, що кожен етап науково-технічного прогресу викликав відповідний стрибок у розбудові транспортної мережі. Так, поява парового двигуна наприкінці XVIII – початку XIX ст. зумовила бурхливе будівництво залізниць у Європі та Північній Америці, що забезпечило ефективне з'єднання віддалених регіонів і здешевлення перевезень [34]. У XX ст. поява та удосконалення автомобіля призвела до формування густої мережі автошляхів, що кардинально збільшило швидкість переміщень та географічне охоплення сполучень, фактично «стискаючи» простір і час для суспільства [87]. На прикладі України можна простежити кілька фаз розвитку транспортної мережі:

- повільне зародження залізниць, гужових шляхів у 18 ст. [15];
- радянський період із масовою індустріалізацією і будівництвом магістралей, особливо у 1960-х рр. [111];

- сучасний період незалежності із структурними змінами і появою нових міжнародних транспортних коридорів [35].

Кількість і протяжність автомобільних шляхів зросли багаторазово: якщо у середині XIX ст. територією України проходили лише перші сотні кілометрів залізниці та близько 30 тис. км автомобільних доріг з твердим покриттям, то на початок XXI ст. експлуатаційна довжина залізничних колій перевищує 20 тис. км, а автомобільних доріг становить понад 160 тис. км [18]. При цьому спостерігається якісне вдосконалення мережі шляхом підвищення категорій доріг, фокусу на будівництві сучасних швидкісних трас замість ґрунтових шляхів, появи розв'язок, об'їзних магістралей навколо міст, електрифікації на залізницях тощо.

Теоретичні дослідження моделюють це вдосконалення як процес росту графа мережі як міської, так і регіональної, де нові вузли і ребра додаються відповідно до потреб економіки та правил оптимізації, які включають мінімізацію відстані, вартості будівництва і максимізації охоплення [88; 108]. Результати таких моделей узгоджуються з емпіричними спостереженнями: розвиток мереж зазвичай відбувається концентрично від основних центрів, із поступовим зростанням зв'язності та переходом від лінійної до складнішої топологічної структури [87]. Як вказано у статті китайських науковців, за перші десятиліття розвитку національної мережі швидкісних автодоріг Китаю у період 1990–2020 рр. її структура еволюціонувала від кількох ізольованих відрізків до єдиної інтегрованої сітки з високою щільністю покриття у приморських провінціях [77]. В цілому, динаміка розвитку структур автомобільної транспортної мережі визначається принципом кумулятивності: кожне нове з'єднання спирається на вже існуючу мережеву конфігурацію, водночас змінюючи її властивості шляхом підвищення доступності, скорочуючи шлях між окремими пунктами [88].

Функціонування транспортної мережі має часову організацію, яка проявляється в добових, тижневих та сезонних коливаннях. Інтенсивність руху протягом доби є нерівномірною: у міських умовах характерні пікові навантаження вранці та ввечері, а вночі інтенсивність знижується. Це зумовлює

необхідність відповідного регулювання – наприклад, застосування реверсивних смуг, зміни режимів світлофорів або проведення технічних робіт у періоди зниженого трафіку [87].

На пасажирському транспорті добова та тижнева ритміка руху забезпечується розкладами, що дозволяють адаптувати частоту рейсів до змін попиту. У вихідні дні кількість рейсів може змінюватися, зменшуючись або збільшуючись залежно від напрямку потоків.

Сезонні коливання додатково впливають на навантаження мережі. Влітку зростає інтенсивність руху у зв'язку з відпустками та туристичними поїздками, тоді як у зимовий період основний вплив залежить від погодних умов та ділової активності. В окремі періоди року навантаження на мережу також зростає через підвищений попит на вантажні перевезення, зокрема під час святкових кампаній або сезонного експорту сільськогосподарської продукції [110].

Усе це формує часову мінливість транспортної доступності, коли ті самі елементи мережі в різні пори року функціонують із різною інтенсивністю. Відповідно, моделювання транспортної доступності потребує врахування сезонного чинника для точнішої візуалізації просторово-часових структур.

Картографування часових характеристик ПЧС транспортної мережі є комплексним непростим завданням, оскільки потрібно передати динамічні або змінювані явища максимально повно. Проте воно надзвичайно важливе. Як слушно зауважено в роботі С. Реуquet (1994), включення часової складової в просторові дані необхідне, щоби відобразити зміни, встановити причинно-наслідкові зв'язки та глибше зрозуміти процеси розвитку геосистем [85]. Іншими словами, без врахування часу наше розуміння транспортної мережі буде неповним.

В роботі Т. В. Дудун виділяються такі основні картографічні підходи до візуалізації станів простору у часі: 1) часові зрізи, коли створюються окремі карти для кожного моменту або інтервалу часу; 2) картографічне стеження, коли аналізується траєкторія руху та швидкість змін об'єкту; 3) кількісна оцінка змін, коли візуалізується різниця кількісних значень об'єктів між двома моментами часу. В кожному із підходів Т. В. Дудун виокремлює відповідні джерела

потенційних неточностей. При використанні часових зрізів неточності можуть виникати через неправильно вибраний часовий інтервал. Якщо інтервал занадто великий, можна пропустити важливі проміжні зміни. При використанні картографічного стеження із недостатньою частотою запису позицій рухомих об'єктів траєкторія руху буде спрощеною, що може спричинити втрату деталей у зміні напрямку руху об'єкта, що знижує точність прогнозування. При оцінці кількісних змін слід уникати використання середніх показників за тривалий період, що може приховати важливі короткострокові коливання, які можуть бути критично важливими для прийняття оперативних рішень.

У контексті відображення ПЧС автомобільних шляхів різночасові карти дозволяють простежити розвиток дорожньої мережі, реконструкцію і будівництво доріг, а також зміни їх конфігурації в залежності від природних чинників. Важливо враховувати, що карти, створені в різні роки, можуть мати різний ступінь деталізації. Співставлення топографічних карт, де «старіші» карти мають значно меншу деталізацію, ніж сучасні цифрові карти, потенційно породжує помилки у визначенні реальної динаміки розвитку мережі доріг [36].

При створенні карт динаміки застосовуються кількісні показники, такі як прирости координат, зміна довжин чи площ. Однак, якщо базові карти мають різні стандарти точності або різні системи координат, виникає неузгодженість, яка може призводити до помилок у розрахунках швидкості зміни станів ПЧС. У такому разі є доцільним використання серій карт, створених за однаковими стандартами або мінімізація неточностей шляхом використання єдиної цифрової геодезичної основи.

Отже, часовий аспект транспортних мереж проявляється подвійно. По-перше, через історичну *генезу мережі* – поступове формування просторової конфігурації під впливом часу через накопичення змін. По-друге, через *періодичні режими роботи мережі* – ритмічні коливання та циклічні зміни інтенсивності використання. Урахування обох складових є важливим при аналізі, картографічному та геоінформаційному моделюванні часового аспекту ПЧС.

Аналіз лише просторових або лише часових особливостей дає фрагментарне уявлення: просторовий контекст без урахування динаміки не показує актуального ступеня доступності, а часові ряди без географічної прив'язки не пояснюють причин нерівномірностей. В контексті збільшення повноти їх представлення синтез обох вимірів є передумовою точного моделювання геосистем, їх частин, а зокрема транспортних мереж і автомобільних шляхів.

ПЧС автомобільних шляхів вписана у природне середовище, а кожен природний фактор має часовий прояв, зумовлюючи сезонні зміни інтенсивності потоків, нерегулярні ремонти та довгострокові зсувні деформації ПЧС автомобільних шляхів. Ігнорування природних факторів при створенні картографічних моделей призводить до потенційної недооцінки вартості спорудження і утримання доріг, а також до помилок у розрахунку маршрутів.

Геоінформаційні системи інтегрують просторові й часові характеристики, відтворюючи динаміку мережі за допомогою анімації різночасових шарів. Комбіноване використання цифрових карт, хмар точок лазерного сканування, добових матриць трафіку та кліматичних сценаріїв дає змогу простежити еволюцію просторово-часових структур транспортної мережі, ідентифікувати додаткові чинники змін та змодельовати ймовірні майбутні стани. Це забезпечує точніше прогнозування пікових навантажень, локалізацію ділянок підвищеного ризику і обґрунтоване планування об'їздів під час ремонтів або несприятливих погодних умов.

Для переходу від узагальнених мережевих показників до одиниць аналізу в роботі пропонується застосувати покомпонентний підхід для формування уніфікованого переліку елементів, що структурований за групами: лінійні сегменти, вузли, штучні споруди, захисна й сервісна інфраструктура, об'єкти управління та безпеки, геоінженерні елементи. На основі переліку створюється ієрархічно систематизована база, що забезпечує стандартизоване кодування даних будь-якої деталізації й дає змогу автоматично переходити між масштабами карт без втрати топологічної та метричної узгодженості.

Синтез просторових і часових складових, доповнений фізико-географічним контекстом, утворює методологічну основу для точного прогнозування розвитку ПЧС транспортної мережі та ПЧС їх елементів, оптимізації витрат на експлуатацію та підвищення стійкості транспортних сполучень. Запропонований підхід безпосередньо підводить до наступного етапу дослідження, де розглядається класифікація автомобільних транспортних мереж і властивості їх просторово-часових структур.

1.4 Класифікації просторово-часових структур автотранспортних шляхів

На підставі викладених теоретичних засад ми представляємо формалізований опис у вигляді систематизованого переліку просторових особливостей і часових змін ПЧС автомобільних шляхів на основі класифікацій автомобільних доріг, отриманого шляхом декомпозиції класів.

1.4.1 Класифікації автомобільних доріг та їх декомпозиція

Класифікація автомобільних доріг має міждисциплінарний характер, оскільки враховує інженерні параметри, просторову організацію, економічні та природні чинники. Найдавніший поділ існував ще за часів Римської імперії, коли дороги поділяли за адміністративним та функціональним підходами [93]. Сучасна класифікація автомобільних доріг є багаторівневою та міждисциплінарною. Вона формується як у межах нормативного регулювання, так і в наукових дослідженнях, де класифікаційні підходи виконують як систематизаційну, так і аналітичну функції.

Класифікації транспортних шляхів *загальноконцептуального* рівня викладено у роботах Ж.-П. Родріге [87]. Транспортні системи можуть одночасно належати до кількох класифікаційних категорій, які базуються на наступних ознаках:

1. Модельній, де визначальним є тип транспорту і включає автомобільний, залізничний, річковий, морський, повітряний, трубопровідний

2. Морфологічній, де геометрична форма і топологічні характеристики сполучень формують різні конфігурації – радіальну, радіально-кільцеву, сітчасту, лінійну, розгалужену або деревоподібну, розімкнену.

3. Функціональній, де визначальним є призначення мережі в територіальній системі, що включає публічні (магістральні, регіональні, локальні) та відомчі (спеціалізовані) дороги.

Класифікації *територіально-ієрархічного* рівня розглядають транспортні мережі на мікро-, мезо-, макро-, мега- та метарівнях. Такий підхід, представлений у роботах Н.Є. Нефедової, акцентує увагу на інтеграції локальних систем у регіональні, національні та міжнародні мережі, що безпосередньо впливає на властивості їх просторово-часової структури, ступінь координації та вимоги до інфраструктури вузлів стику [18].

У нормативно-правовому полі України класифікація доріг реалізується передусім за адміністративним принципом. У Законі «Про автомобільні дороги» виокремлюються дороги державного значення, які включають міжнародні, національні, регіональні, територіальні дороги і місцевого значення, які включають обласні та районні дороги (рис 1.1) [27].

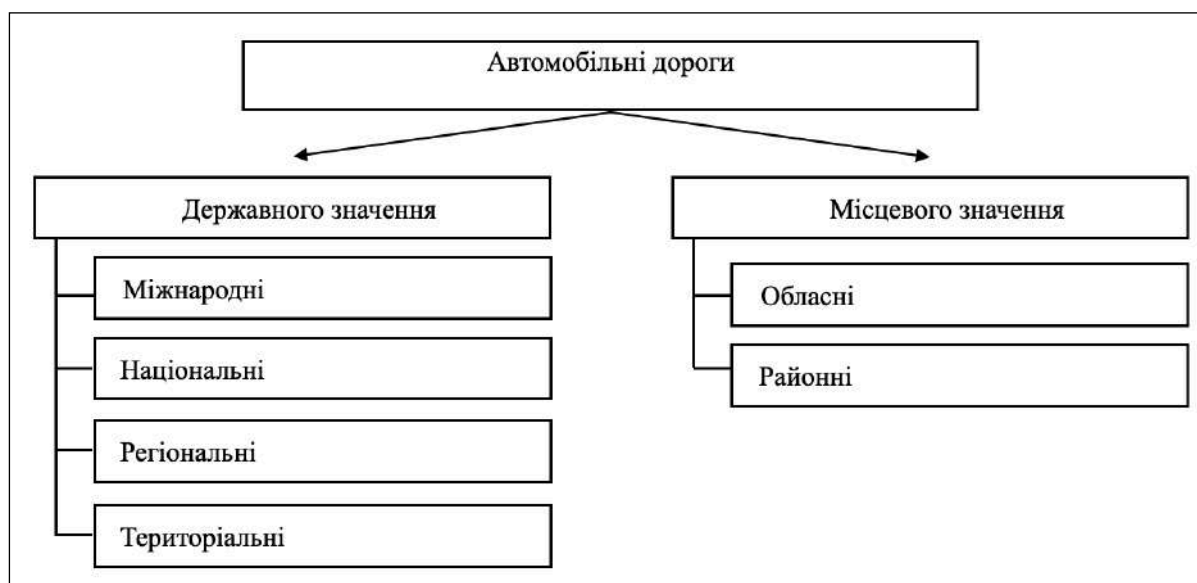


Рисунок 1.1 – Схема класифікації автомобільних доріг за адміністративним підходом (складено автором за [27]).

Важливою для автотранспортної галузі з точки зору будівництва та обслуговування доріг є технічна або техніко-експлуатаційна класифікація. Вона закріплена у державних будівельних нормах, де автомобільні дороги розподілені за інженерними параметрами [9]. Існує п'ять основних технічних категорій доріг (I, II, III, IV, V), де основними критеріями віднесення до певної категорії є розрахункова інтенсивність руху, розрахункова швидкість руху, кількість смуг руху, ширина смуги руху, наявність та ширина розділювальної смуги.

Функціональна класифікація, хоч і не закріплена в українському законодавстві, активно обговорюється у науковому середовищі. Як вказує Н. О. Арсеньєва, функціональна класифікація ще з 50-60-х рр. XX ст. була активно впроваджена у країнах Заходу через зростання рівня автомобілізації і це питання сьогодні є практично вирішеним для їх наукової спільноти.

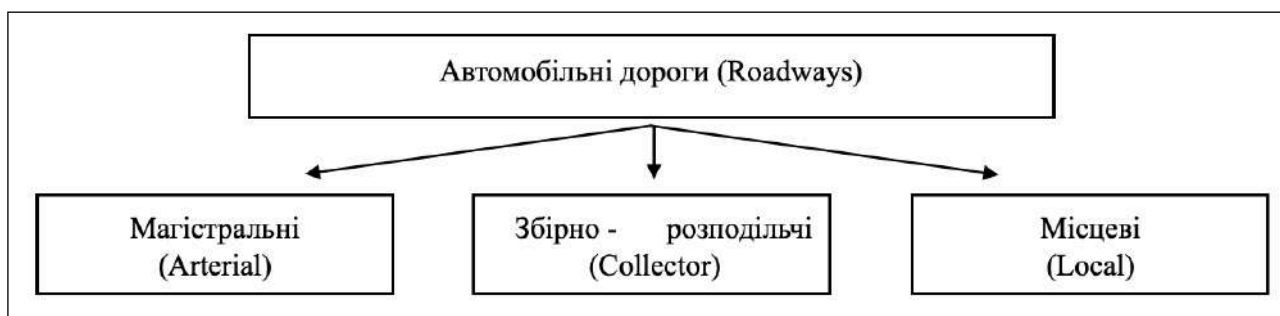


Рисунок 1.2 – Схема функціональної класифікації автомобільних доріг (складено автором за [2; 122]).

Також зазначається, що ця класифікація призначена для розгляду автомобільних доріг як елементів з'єднання районів тяжіння транспортних потоків з мережею автомобільних доріг загального користування, що дозволяє формувати ефективні і раціональні транспортні потоки. Н. О. Арсеньєва пропонує адаптувати наявний зарубіжний досвід до українських реалій та пропонує розглядати дороги, відносячи їх до класів за основними споживчими функціями: з'єднання, освоєння (під'їзди), зупинки [2]. У свою чергу ці класи

відповідають класам *arterial*, *collector*, *local* із офіційної функціональної класифікації автомобільних доріг США (рис. 1.2) [122].

Окремим напрямом є ландшафтно-геоморфологічна регіональна класифікація доріг, представлена в роботах українських науковців. У своїй дисертації Ю. В. Яцентюк пропонує класифікувати антропогенні парадинамічні та парагенетичні ландшафтні системи за закономірностями, спрямованістю, змістом, вираженістю, силою, характером впливу, характером людської діяльності. У класифікації за характером людської діяльності одним із запропонованих класів виділено дорожні ландшафти, які автор поділяє на шосейні та залізничні [41]. Г. І. Денисик та О. М. Вальчук-Оркуша пропонують відносити дорожні ландшафти до одного із класів антропогенних ландшафтів, які в свою чергу поділяються на такі підкласи: 1) шосейні, 2) залізничні; 3) трубопровідні; 4) лінії електропередач та зв'язку. Шосейні ландшафти включають у себе наступні варіанти: а) стежки, б) ґрунтові, в) гравійно-щебенисті, г) кам'яні, ґ) асфальтобетонні, д) змішані та ін. Подальший поділ за ієрархією відбувається відповідно до типу місцевості. Так у межах Поділля серед варіантів шосейних дорожніх ландшафтів пропонується виділяти наступні типи: заплавні, надзаплавно-терасові, схилові, вододільні, останцево-вододільні, товтрові та інші [10].

Розглянуті класифікації автомобільних доріг – адміністративні, функціональні, технічні чи геоморфологічні – здебільшого подають транспортну мережу як сукупність лінійних об'єктів певного рангу. Хоча такий підхід є зручним для нормативного поділу, він не враховує складної внутрішньої структури мережі та динаміки її розвитку в просторі й часі.

У цьому контексті доцільним є застосування ієрархічного підходу, який дозволяє аналізувати мережу на трьох рівнях: мікро-, мезо- та макрорівні. На мікрорівні розглядаються конструктивні елементи дороги, включаючи геометричні характеристики, матеріали покриття та вплив природних умов. Мезорівень охоплює взаємодію окремих елементів у вузлах і хабах, просторові зв'язки між ділянками та вплив інтенсивності руху. Макрорівень дозволяє

оцінити мережу як єдину систему, що функціонує у великому просторовому і часовому масштабі, з урахуванням глобальних тенденцій та змін.

У дослідженні запропоновано авторську декомпозицію мережі шляхом формування систематизованого переліку компонентів, що охоплює ключові структурні елементи й дозволяє зберігати критично важливу інформацію. Такий підхід забезпечує цілісне моделювання мережі, дає змогу уникнути втрат під час узагальнення та підтримує топологічну і метричну узгодженість під час масштабування.

Декомпозиція також дозволяє виявити ті компоненти, які можуть бути картографічно представлені за наявності відповідних даних (в таблицях 1.1 - 1.4 показано жовтим кольором), і відокремити ті, візуалізація яких наразі неможлива через нестачу або фрагментарність просторової інформації (в таблицях 1.1 - 1.4 показано червоним кольором). Це, у свою чергу, створює підґрунтя для оцінки потенціалу розвитку картографічного моделювання відповідно до доступності даних і обраного масштабу.

За адміністративно-правовим підходом дороги розрізняються як за своїм покриттям (грунтова, асфальт, бетон), так і за правилами утримання та фінансування. Якщо місцеві (районні/обласні) шляхи та державні (національні, міжнародні) показані на карті однаково, то зникає інформація про відмінності в нормах безпеки, наявності освітлення чи важливості певних маршрутів. Також дороги можуть змінювати свій статус, наприклад, переходити з місцевих у державні при зростанні їх значущості, проте якщо ці зміни не фіксуються у часі, це призводить до плутанини під час оновлення карт. Окрім того, місцеві дороги нерідко містять невеликі мости, труби для перетину потічків чи мають обмежене освітлення, що залишається поза увагою, коли лінійне зображення не деталізується додатковими елементами (таблиця 1.1). У підсумку неточні дані щодо юридичного статусу траси, її покриття й оснащення негативно позначаються на плануванні маршрутів, прогнозах ремонтів та оцінці пропускної здатності.

Таблиця 1.1

Декомпозиція ПЧС автомобільних шляхів на просторові особливості та прояви часових змін за адміністративно-правовим підходом

Клас	Просторові особливості (типові інфраструктурні елементи)	Прояв часових змін
1	2	3
Місцеві дороги (районні та обласні)	- 1–2 смуги руху (ширина смуги 3,0–3,25 м, узбіччя 0,5–1,5 м, відсутність системного водовідведення); - відсутня або мінімальна розділювальна смуга; - нерегульовані перехрестя; - т-подібні примикання; - простий набір дорожніх знаків; - обмежене освітлення; - невеликі водопропускні споруди для перетину потічків; - можливі ґрунтові чи асфальтобетонні покриття середньої якості.	- ступінь сезонного впливу (весною та восени розмиви, зимою – снігові замети); - зміни інтенсивності руху, що ініціюють перехід від ґрунтового до асфальтобетонного покриття; - корегування схем регулювання у відповідь на зміну інтенсивності використання; - індикація ступеню відповідності категорії «державна» для зміни статусу (у динаміці зростання транспортного навантаження за останні 5–10 років)
Державні (національні, регіональні, територіальні)	- покриття кращої якості (асфальт або бетон); - 2–4 смуги (залежно від інтенсивності); - світлофорні або кільцеві перехрестя; - мости або шляхопроводи середньої довжини; - облаштовані узбіччя; - сервісні пункти; - більша щільність встановлених знаків; - комплексна розмітка.	- зміни інтенсивності руху; - хід виконання й періодичність ямкового ремонту; - річний прогрес виконання держпрограм з оновлення покриття; - динаміка наближення до критеріїв категорії «міжнародна» (TEN-T / Е-шляхи) для подальшої зміни статусу.
Міжнародні (Е-дороги, TEN-T)	- 4 і більше смуг; - багаторівневі розв'язки; - великі мости, естакади; - наявність шумозахисту; - водоналивні бар'єри та бар'єри жорсткого типу; - інтелектуальні системи руху (камери, змінні знаки, сповіщувальні табло); - якісне освітлення;	- річний прогрес модернізації до міжнародних стандартів; - динаміка виконання ремонтів дорожнього покриття; - квартальний або річний прогрес впровадження нових технологій (SMART-систем)

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
Міжнародні (Е-дороги, TEN-T)	- повноцінні сервісні зони: АЗС, місця відпочинку, ваговий контроль, станцій вагового контролю в русі (WIM-station), аварійні (зупинкові) смуги; - бар'єри безпеки по всій довжині.	

У функціональній класифікації доріг, якщо місцеві (міські чи сільські) та магістральні дороги зобразити без належної диференціації, користувач не побачить різниці у кількості смуг, наявності світлофорів чи припустимих швидкісних режимах (таблиця 1.2). Надалі це призводить до помилок у транспортному плануванні й виборі оптимальних маршрутів. Крім того, із зростанням забудови й трафіку локальні дороги можуть переходити до категорії збірно-розподільчих, що передбачає встановлення додаткової інфраструктури: освітлення, паркувальних зон, смуг для громадського транспорту та інше.

Таблиця 1.2

Декомпозиція ПЧС автомобільних шляхів на просторові особливості та прояви часових змін за функціональним підходом

Клас	Просторові особливості (типові інфраструктурні елементи)	Прояв часових змін
1	2	3
Місцеві	- одно- чи двосмуговий рух із можливими виїздами з приватних садиб; - мінімальна розмітка (суцільна або переривчаста осьова) або її відсутність; - звичайні нерегульовані Т-перехрестя; - паркування уздовж узбіч; - місцями зустрічаються тротуари та велодоріжки	- частота оновлення покриття у відповідь на зростання щільності забудови; - поява нових знаків або заміна старих; - поява нового освітлення чи заміна існуючого; - динаміка реалізації заходів безпеки (встановлення бар'єрів, освітлення тощо) у відповідь на збільшення транспортного потоку; - індикація повноти дотримання безпекових вимог;

Продовження таблиці 1.2

1	2	3
Місцеві		- річна динаміка параметрів, що наближають дорогу до класу «збірно-розподільчих» (кумулятивне відхилення від нормативів)
Збірно-розподільчі	- вузли зі світлофорами чи невеликими кільцевими розв'язками; - частіші зупинки громадського транспорту; - наявність паркувальних зон; - виділені маршрути для вантажівок у містах; - освітлені пішохідні переходи; - 2–3 смуги руху.	- квартальна або річна зміна інтенсивності руху при збільшенні обсягу транспортних засобів; - щомісячний відсоток виконання робіт з реконструкції (динаміка завершення); - прогрес виконання планів з реконфігурації вузлів (щоквартальна частка вузлів, переведених зі світлофорного на кільцевий рух, у загальному плані реконфігурації)
Магістральні	- 4 і більше смуг із розділювальною смугою та/або відбійником; - регульовані перехрестя; - багаторівневі розв'язки; - системи контролю швидкості (камери, радари); - наявність шумозахисту.	- щогодинний/добовий профіль інтенсивності руху для кожної траси; - щотижневий темп зміни транспортного потоку, % до попереднього тижня; - інтервал між циклами ремонтних оновлень (кількість днів від останнього ремонту); - автоматичні сповіщення про часові вікна активності світлофорів (графік перемикання режимів).

За техніко-експлуатаційним підходом дороги розподіляються за категоріями (I-а, I-б, II, III, IV, V) залежно від конструкції, кількості смуг, допустимої швидкості та інших параметрів. Якщо на карті однаково виглядають як автобани (I-а) зі швидкістю руху 110–130 км/год, і ґрунтові шляхи (V) зі складною сезонною прохідністю, перевізники можуть помилково розраховувати на високу якість покриття там, де її немає. Так само важливим є відображення штучних споруд (багаторівневих розв'язок, мостів, бар'єрної огорожі тощо) для вищих за рангом доріг категоріях або коротких містків і простої розмітки для

нижчих (таблиця 1.3). Усе це впливає на психологічний стан водіїв, безпеку, пропускну спроможність і оптимальне планування маршрутів.

Таблиця 1.3

Декомпозиція ПЧС автомобільних шляхів на просторові особливості та прояви часових змін за техніко-експлуатаційним підходом

Категорія	Просторові особливості (типові інфраструктурні елементи)	Прояв часових змін
1	2	3
V	- ґрунтова або гравійна дорога; - відсутність дорожньої розмітки; - мінімум знаків, переважно попереджувальні; - водопропускні труби замість мостів; - невеликі містки, часто саморобні.	- річний індекс сезонної руйнації – середня глибина колії/ями після весняної та осінньої відлиг; - хід (%) виконання плану модернізації покриття до категорії «IV» (щоквартальний звіт).
IV	- 2 смуги, асфальтобетонне покриття; - невеликі містки (не саморобні); - наявність узбіччя; - зупинки маршрутних транспортних засобів; - проста розмітка (суцільна або переривчаста осьова).	- помісячне відхилення фактичного обсягу ремонтів від річного графіка; - середньодобовий приріст/зниження трафіку, % до попереднього року; - індикація прогресу та етапів реконструкції або побудови додаткових смуг.
III	- 2 повноцінні смуги із розділювальною смугою; - наявність розширення для обгону; - шляхопроводи над залізницею - огороження та відбійники на небезпечних ділянках;	- річний прогрес оновлення споруд для відповідності нормам безпеки; - річна динаміка наближення параметрів (швидкість, смуги, бар'єри) до стандартів категорії «II».
II	- 2–4 смуги в одну сторону із зазначенням розділювальної смуги; - канали і кармани для розворотів; - обмежувальні бар'єри; - наявність освітлення.	- прогрес проведення ремонтів (км за квартал або рік); - періодичність проведення інструментального контролю покриття (днів між обстеженнями); - прогрес (%) виконання проведення поточного ремонту; - річна динаміка наближення параметрів (швидкість, смуги, бар'єри) до стандартів категорії «I-б».
I-б	- ≥ 4 смуги; - наявність розділювальної смуги; - наявність відбійника; - завчасна індикація наявності з'їзду;	- річна динаміка наближення до параметрів стандартів категорії «I-а»;

Продовження таблиці 1.3

1	2	3
I-б	- багаторівневі розв'язки на ключових вузлах.	- прогрес (%) щорічного або планового багаторічного виконання реконструкції для посилення контролю доступу (перенесення та перепланування другорядних доріг, що примикають під прямим кутом, будівництво додаткових розв'язок).
I-а	- наявність більше, ніж 4 смуги; - багаторівневі розв'язки (відсутність перетинів в одному рівні); - дорожня розмітка (іноді із наявністю звукового ефекту для привертання уваги); - повний контроль доступу; - наявність обов'язкового огородження; - відсутність заїздів із локальних доріг.	- прогрес (%) виконання ремонтів та планового системного утримання (індикація оновлення покриття, відбійників, інформаційних систем тощо); - прогрес інтеграції інтелектуальних транспортних систем; - прогрес реконструкції у разі різкого зростання інтенсивності руху (індикація стану додавання смуг, розв'язок тощо).

У контексті ландшафтно-геоморфологічного підходу при картографуванні автомобільних шляхів до уваги береться місцевість та її особливості для позначення наявності нестандартних інженерних рішень. Якщо на схилових ділянках шлях позначається прямою лінією без позначення серпантинів, укріплених узбіч чи підпірних стінок, ігнорується ризик зсувів та аварійно небезпечних поворотів.

Таблиця 1.4

Декомпозиція ПЧС автомобільних шляхів на просторові особливості та прояви часових змін за ландшафтно-геоморфологічним підходом

Клас (тип місцевості)	Просторові особливості (типові інфраструктурні елементи)	Прояв часових змін
1	2	3
Заплавні	- насипи чи палі через заболочені або заплавні ділянки; - мости й естакади над зонами паводків; - особливі дренажні системи;	- динаміка сезонного підйому води, паводку; - річна та квартальна ймовірність загрози підтоплення;

Продовження таблиці 1.4

1	2	3
Заплавні	- підсилені узбіччя; - габійні укріплення берегів.	- прогрес і періодичність регулярного обстеження стану палевих та естакадних конструкцій; - очікуване підвищення насипу (см/рік) за прогнозом рівня води.
Надзаплавно-терасові	- вища (стабільна) тераса над річковою заплавою; - мости; - об'їзди.	- середній річний темп ерозії схилів (см/рік), що межують із заплавою; - індикація приросту потоків води відносно стабільного стану; - річна динаміка наближення параметрів схилу до нормативів (% до стандарту).
Схилові	- ділянки на схилах із індикацією значення ухилу; - підпірні стінки; - снігозахисні споруди (щити, галереї); - укріплення узбіч; - неглибокі виїмки; - наявність відкосів; - покращене водовідведення.	- зміна ступеня еродованості схилів (при частих опадах) - динаміка та інтенсивність зсувних процесів; - прогрес встановлення укріплень чи проведення реконструкцій; - річний приріст деформацій покриття (мм кривизни/км).
Вододільні	- межі басейнів річкових систем; - кути поворотів траси; - індикація ступеня відкритості території; - снігозахисні споруди (щити, галереї);	- динаміка встановлення захисних споруд від вітрових і снігових переметів; - динаміка еродованості вододільних плато; - річне збільшення ймовірності локальних зсувів (%/рік).
Останцево-вододільні	- індикація кутів поворотів траси; - індикація ухилу траси; - наявність тунелів; - наявність глибоких виїмок; - наявність укріплення для схилів і виїмок.	- динаміка та інтенсивність розмивання схилів; - темп ерозії схилів після останньої реконструкції (зокрема швидкість поглиблення виїмок і зміни стійкості земляного полотна); - хід впровадження інженерних заходів для доведення конструкцій до актуальних норм безпеки.
Товтрові	- вапнякові гряди; - карстові прояви; - дренажні галереї або естакади в обхід карсту - унікальні ландшафтні маршрути.	- динаміка прояву карстових процесів; - динаміка експлуатації дороги в залежності від інтенсивності прояву природних процесів;

Продовження таблиці 1.4

1	2	3
Товтрові		- динаміка приведення інженерних об'єктів до відповідності безпековим вимогам; - динаміка зростання туристичної привабливості та ініціатив облаштування інфраструктури (оглядові майданчики, стоянки).

У заплавних зонах дороги часто облаштовані насипами, палями й естакадами, призначеними для подолання сезонних підйомів води (таблиця 1.4). Неврахування таких конструктивних деталей призводить до заниження оцінки ймовірності затоплень, пошкоджень і непрогнозованих перекриттів. Аналогічно в гірських районах, де потрібні довгі тунелі або укріплені виїмки, класичне зображення шляху не дає інформації про додаткові споруди й пов'язані з ними витрати чи обмеження.

Кожна з розглянутих класифікацій дозволяє впорядкувати різноманіття об'єктів та їхніх станів у структуровану базу компонентів, за допомогою якої дорожній клас може бути описаний як сукупність елементів із відповідними параметрами.

1.4.2 Систематизовані переліки компонентів ПЧС автомобільних шляхів на основі декомпонованих класифікацій

Вище викладене структурування елементів ПЧС доріг безпосередньо сприяє підвищенню точності геоінформаційного та картографічного моделювання і візуалізації, оскільки забезпечує деталізацію об'єктів відповідно до їхньої ролі у просторово-часовій структурі транспортної мережі. На основі вищезазначених класифікацій виділено шість ключових груп компонентів: 1) лінійні дорожні сегменти, 2) вузлові об'єкти, 3) штучні споруди, 4) інфраструктура обслуговування, 5) системи управління і безпеки, 6) додаткові геоінженерні та ландшафтні елементи.

Систематизовані переліки компонентів, складених автором для кожної групи, наведено у таблицях 1.5–1.10. Вони мають орієнтовний характер і

можуть бути доповнені в процесі натурних досліджень. Повнота картографічного представлення залежатиме від доступності, актуальності та деталізації просторових даних, зібраних для кожного з елементів.

Типові варіанти лінійних дорожніх сегментів у межах автомобільної мережі з урахуванням їх ключових параметрів, класифікаційних варіацій та динамічних змін представлено в таблиці 1.5. Такий підхід дозволяє здійснювати картографування з урахуванням масштабу, рівня деталізації та можливих змін стану сегментів у часі.

Таблиця 1.5

Групи компонентів дорожніх сегментів (лінійні відрізки дороги)

ID	Назва	Ключові параметри	Варіанти (у різних підходах до класифікацій)	Просторово-часові особливості	Де зустрічається
1	2	3	4	5	6
A1	Одно- / двосмугова дорога	- ґрунтове, гравійне покриття, іноді асфальт; - ширина проїзної частини (3–6 м); - швидкісний режим (30–50 км/год).	- адміністративно-правовий: місцеві; - функціональний: місцева; - техніко-експлуатаційний: V, IV категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: всі.	- динаміка трансформації з ґрунтового в асфальтоване чи асфальтобетонне покриття; - індикація прогресу розширення на 2 повноцінні смуги; - прогрес періодичного капремонту або ґрейдерування (згідно із динамікою погіршення стану).	типові для локальних доріг, сільських шляхів, під'їздів до невеликих населених пунктів.
A2	Двосмугова асфальтована	- асфальтобетон або бетон; - може мати освітлення; - швидкісний режим 50–70 км/год.	- адміністративно-правовий: місцеві або державні; - функціональний: місцеві або збірно-розподільчі; - техніко-експлуатаційний: IV, III категорія;	- регулярність оновлення покриття 5–10 років (переважно латкові ремонти); - прогрес реконструкції шляхом додавання 3-ї смуги (для обгону в горах);	Районні або обласні дороги, збірно-розподільчі у містах, державних трасах із помірним трафіком.

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4	5	6
A2	Двосмугова асфальтована		- ландшафтно-геоморфологічний: всі.	- необхідність додавання 2-х смуг у процесі капітальної реконструкції при збільшенні транспортного навантаження.	
A3	4 і більше смуг із розділенням відбійником або ґрунтовою смугою	- наявність розмітки, відбійника; - ширина 7–15 м; - швидкісний режим 90-110 км/год.	- адміністративно-правовий: державні, міжнародні; - функціональний: магістральна; - техніко-експлуатаційний: II, I-б категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: всі, але потребує додаткових інженерних рішень.	- поступове підвищення інтенсивності руху; - з часом можливе розширення до 6–8 смуг; - прогрес встановлення інженерних елементів для комфорту та безпеки.	зустрічається на міжміських магістралях, швидкісних ділянках у містах, державних та міжнародних шосе.
A4	Автомагістраль (повний контроль доступу)	- ≥ 4 смуги, розділювальна смуга; - відсутність перехресть в одному рівні; - швидкість 110–130+ км/год.	- адміністративно-правовий: міжнародні; - функціональний: магістралі; - техніко-експлуатаційний: I-а; - ландшафтно-геоморфологічний: всі, але потребує індивідуальних інженерних рішень.	- періодичні оновлення покриття; - високі вимоги до безпеки, постійний моніторинг; - можливе добудовування смуг у разі суттєвого зростання обсягу транспортних засобів.	головні швидкісні дороги, міжнародні коридори (автобани).
A5	Специфічні «серпантини», насипи	- серія крутих поворотів, ухили;	- адміністративно-правовий: може бути місцевий чи державний, залежно від важливості;	- періодичне оновлення покриття для підтримання стандартів через активні зсувні та ерозійні процеси;	характерні для гірських/схиливих районів, де неможливо прокласти пряму дорогу.

Продовження таблиці 1.5

1	2	3	4	5	6
A5	Специфічні «серпантини», насипи	- зміцнення узбіч, підпірні стінки; - швидкісний режим 30–70 км/год.	- функціональний: місцева чи збірно-розподільча (іноді магістральна у горах); - техніко-експлуатаційний: III–V (рідко II) категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: схилі, товтрові, гористі.	- можливе часткове «випрямлення» траси з часом; - стан та динаміка зимового обслуговування (протиожедні засоби, лавинозахист).	

На великомасштабних картах важливо точно відображати ширину проїзної частини, наявність додаткових смуг чи відбійників, ухили, зміцнення тощо, адже ці параметри прямо впливають на безпеку руху, ремонтпридатність і можливість проїзду. У дрібномасштабному зображенні сегменти типу A1–A2 можуть мати схожі графічні символи, однак відмінності між ними суттєві для аналізу функціонального навантаження, швидкісних режимів і потенціалу розвитку.

Просторово-часові особливості сегментів вказують на типові сценарії змін – наприклад, розширення шляхом додавання смуг, оновлення покриття або перехід до вищої категорії внаслідок зростання інтенсивності руху. Таке структурування дає змогу сформувати наочні динамічні моделі автомобільних шляхів, що відображають їх розвиток у просторі й часі.

Систематизація частин вузлових об'єктів дорожньої мережі за рівнем складності показана в таблиці 1.6. У великомасштабному картографуванні доцільно окремо позначати тип вузла, адже його конфігурація суттєво впливає на інтерпретацію пропускну здатності та безпеки руху. Для вузлів типу B1–B2 можлива умовна генералізація, але елементи B3–B4 потребують акцентованого відображення, оскільки вони відіграють ключову роль у функціонуванні інфраструктури.

Групи компонентів вузлів / перехресть / розв'язок

ID	Назва	Ключові параметри	Варіанти (у різних підходах до класифікацій)	Просторово-часові особливості	Де зустрічається
1	2	3	4	5	6
B1	нерегульовані «Т» чи «Х»-перехрестя	- відсутність світлофорів; - єдині знаки пріоритету або STOP; - малі радіуси виїздів.	- адміністративно-правовий: місцеві; - функціональний: місцеві; - техніко-експлуатаційний: V, IV категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: всі.	- можливість трансформації в регульовані перехрестя за зростання інтенсивності руху; - з часом облаштовуються елементами обмеження швидкості та безпеки.	зазвичай у малонаселених зонах, сільських дорогах, другорядних вулицях.
B2	світлофорне перехрестя / невелике кільце	- світлофор із 2–4 фазами або кільцевий рух; - пішохідні переходи, острівці безпеки.	- адміністративно-правовий: державні (часто), іноді місцеві; - функціональний: збірно-розподільчі; - техніко-експлуатаційний: III, II категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: всі.	- імовірне встановлення додаткових смуг при зростанні інтенсивності потоку автотранспортних засобів; - можливий перехід у багаторівневий формат; - реконфігурація схем управління залежно від зміни трафіку.	поширено в містах або передмістях, на деяких державних трасах.
B3	багаторівневі розв'язки	- мінімум два рівні; - з'їзди з плавними радіусами, часто естакади.	- адміністративно-правовий: міжнародні; - функціональний: магістральні;	- при зростанні обсягу транспортних засобів добудовують додаткові елементи траси;	характерно для автомагістралей, швидкісних міських доріг

Продовження таблиці 1.6

1	2	3	4	5	6
V3	багаторівневі розв'язки		- техніко-експлуатаційний: I-б, I-а категорія; - ландшафтно-геоморфологічний : всі, але потребує додаткових інженерних рішень.	- розширення естакад; - впровадження інтелектуальних транспортних системи (камери, табло та інші).	
V4	примикання до сервісних зон / хабів	- з'їзд на АЗС, логістичні центри, парковку; - можуть бути окремі зони відпочинку та паркування/ паралельно дорозі.	- адміністративно-правовий: найчастіше державні або міжнародні; - функціональний: збірно-розподільчі або магістральні; - техніко-експлуатаційний: II, I-б, I-а категорія; - ландшафтно-геоморфологічний : всі, але потребує додаткових інженерних рішень.	- розширення кількості смуг; - інтеграція інформаційних систем; - інтеграція відпочинкових зон.	міжміські траси з комплексами обслуговування, міжнародні коридори TEN-T.

Просторово-часові зміни в контексті вузлів найчастіше проявляються у вигляді поступової модернізації (від простих перехресть до світлофорних або кільцевих), адаптації до змін потоків, реконфігурації схем управління, а також інтеграції додаткових елементів безпеки. Врахування таких змін дозволяє забезпечити актуальність моделей у геоінформаційних системах та сприяє підвищенню точності аналізу розвитку мережі в динаміці.

В таблиці 1.7 систематизовано штучні конструкції дорожньої інфраструктури за їх масштабом, конструктивною складністю та функціональним значенням. У великомасштабному картографуванні необхідно більш детально відображати технічні параметри мостів, естакад, тунелів і підпірних споруд, оскільки саме ці об'єкти значною мірою впливають на

безпеку руху, пропускну здатність та стійкість мережі. Для дрібномасштабних карт дрібні конструкції (C1, C2) можуть бути узагальнені, але великі мости, тунелі та захисні елементи (C3–C5) повинні позначатись окремо.

Таблиця 1.7

Групи компонентів штучних споруд

ID	Назва	Ключові параметри	Варіанти (у різних підходах до класифікацій)	Просторово-часові особливості	Де зустрічається
1	2	3	4	5	6
C1	малі містки, труби	- 1–2 прольоти, до 25 м; - металева або залізобетонна балка чи труба.	- адміністративно-правовий: місцеві; - функціональний: місцеві; - техніко-експлуатаційний: V, IV категорія; - ландшафтно-геоморфологічний : всі.	- потребують періодичного ремонту чи реконструкції; - можливий перехід у міст більшої пропускної здатності.	локальні річки, потічки, сільська місцевість.
C2	середні мости та шляхопроводи	- 2–5 прольотів, довжина 30–150 м; - визначене навантаження.	- адміністративно-правовий: державні; - функціональний: збірно-розподільчі, іноді магістральні; - техніко-експлуатаційний: III, II категорія; - ландшафтно-геоморфологічний : всі.	- ремонт опор, розширення прольоту; - добудова тротуарів чи велодоріжок.	державні траси, збірно-розподільчі магістралі в містах.
C3	великі мости та естакади	- багатопрольотні (200+ м), зустрічаються вантові, аркові конструкції; - висока пропускна здатність (4+ смуг).	- адміністративно-правовий: міжнародні; - функціональний: магістральні; - техніко-експлуатаційний: I-б, I-а категорія; - ландшафтно-геоморфологічний : всі.	- постійний моніторинг і технічне обслуговування; - дорога часто має роздільні проїзди; - можлива повна реконструкція зі зміною типу конструкції.	на автомагістралях, міжнародних коридорах, великих річках, у мегаполісах.

Продовження таблиці 1.7

1	2	3	4	5	6
C4	тунелі / галереї	- довжина (короткі <500 м, середні 0,5–2 км, великі >2 км); - системи вентиляції, освітлення, пожежна безпека.	- адміністративно-правовий: міжнародні чи державні; - функціональний: збірно-розподільчі або магістральні, якщо гірський регіон; - техніко-експлуатаційний: II–I-а категорія, залежить від важливості дороги.	- регулярний моніторинг, ремонт, технічне обслуговування; - можливе добудовування паралельного тунелю (для розділення потоків); - оперативне реагування на ризики та критичні події як обвали, просідання, затоплення.	схилові/гірські райони, товтрові, складні рельєфи.
C5	підпірні стінки, берми	- високі підпори, з бетону або габіони; - круті схили; - захист від зсуву, обвалу.	- адміністративно-правовий: всі; - функціональний: всі; - ландшафтно-геоморфологічний: схилові, заплавні (берегоукріплення), останцеві; - техніко-експлуатаційний: від III до I-а категорія, якщо дорога у складному рельєфі	- поступове руйнування через ерозійні процеси; - періодичне підсилення або заміна елементів укріплення.	поширені на дорогах, що прокладено через складний рельєф: гірські серпантини, вирізані схили, високі береги річок

Просторово-часові зміни у таких об'єктах виявляються у вигляді технічних оновлень, ремонтів, реконструкцій або навіть повної заміни, що пов'язано зі зростанням навантаження або дією природних чинників (зсуви, паводки, ерозія). Регулярне картографічне оновлення цих змін є необхідним для управління дорожньою мережею, оцінки ризиків експлуатації та забезпечення оперативного реагування на надзвичайні ситуації.

У таблиці 1.8 представлено частину елементів інфраструктури обслуговування за типом, складністю та функціональним навантаженням. У великомасштабному картографуванні доцільно точно позначати сервісні

об'єкти, включаючи їх розмір, тип послуг, під'їзні шляхи та рівень облаштування. Для загальнонаціональних або регіональних карт актуальним є зображення лише ключових сервісних зон: великих логістичних хабів, зон відпочинку, АЗС, пунктів вагового контролю.

Таблиця 1.8

Групи компонентів інфраструктури обслуговування

ID	Назва	Ключові параметри	Варіанти (у різних підходах до класифікацій)	Просторово-часові особливості	Де зустрічається
1	2	3	4	5	6
D1	прості зупинки, павільйони	- накриття, лавка, інфотабличка; - іноді без тротуару.	- адміністративно-правовий: місцеві; - функціональний: місцеві; - техніко-експлуатаційний: V, IV категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: всі.	- можливе поліпшення (облаштування, освітлення); - можуть розширюватись за умов збільшення транзиту.	у селах, невеликих містах, на другорядних дорогах.
D2	облаштовані зупинки та невеликі сервіс-об'єкти	- навіс, сидіння, урна, освітлення, додаткова парковка; - іноді торгова лавка, кафе.	- адміністративно-правовий: державні; - функціональний: збірно-розподільчі; - техніко-експлуатаційний: III, II категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: всі.	- може розширюватись до повноцінної сервісної зони; - періодичний ремонт, встановлення санвузла.	типово на дорогах середнього значення, збірно-розподільчих трасах.
D3	зона відпочинку. АЗС, пункти вагового контролю	- паркування для фур, туалети, душ, кафе; - можливе зважування в русі (WIM), зарядні станції для електричних авто.	- адміністративно-правовий: міжнародні; - функціональний: магістральні; - техніко-експлуатаційний: I-б, I-а категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: всі.	- поступово розширюються, створюється більше паркомісць, нові сервіси, з'являється Wi-Fi, магазини; - адаптація до нових транспортних технологій (електрозарядки, WIM, Wi-Fi).	зустрічається на автомагістралях, міжнародних коридорах (TEN-T), крупних артеріальних магістралях у передмістях.

Продовження таблиці 1.8

1	2	3	4	5	6
D4	логістичні хаби, термінали (для вантажів)	- склади, митний контроль, інтермодальні майданчики.	- адміністративно-правовий: міжнародні, іноді державні; - функціональний: магістральні; - техніко-експлуатаційний: I-б, I-а категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: всі, але потребує додаткових інженерних рішень.	- поступове збільшення площі обсягу логістичних операцій; - оснащення інтелектуальними інформаційними системами (RFID, контролери, відеоспостереження).	на ключових перетинах транспортних коридорів, при великих промзонах, прикордонних переходах.

Просторово-часова динаміка таких об'єктів проявляється через їх розвиток, оновлення або заміну залежно від попиту, транспортного навантаження та змін у нормативній базі. Наприклад, зростання кількості електромобілів ініціює облаштування нових зарядних станцій, а збільшення потоку вантажного транспорту вимагає розширення паркінгів та модернізації логістичної інфраструктури. Для навігаційних та логістичних ГІС-систем фіксація таких змін є критично важливою – як для оперативного планування маршрутів, так і для забезпечення комфорту водіїв та пасажирів.

У таблиці 1.9 узагальнено частину компонентів систем управління і безпеки дорожнього руху відповідно до рівня технологічного оснащення та функціонального призначення. У великомасштабному картографуванні ці елементи дозволяють точно передати конфігурацію дорожніх знаків, місця встановлення світлофорів, огорожень, відеокамер і шумозахисних екранів, що критично важливо для аналізу рівня безпеки і керованості руху.

Групи компонентів системи управління і безпеки

ID	Назва	Ключові параметри	Варіанти (у різних підходах до класифікацій)	Просторово-часові особливості	Де зустрічається
1	2	3	4	5	6
E1	мінімальний набір знаків, базова розмітка	- головна або другорядна полоса; - іноді нанесено осьову лінію; - іноді зустрічається пішохідна розмітка.	- адміністративно-правовий: місцеві; - функціональний: місцеві; - техніко-експлуатаційний: V, IV категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: всі.	- з часом може збільшуватись щільність розмітки та кількість знаків; - за зростанням інтенсивності руху або аварійності може переходити в категорію E2 або E3.	другорядні дороги, мала інтенсивність.
E2	світлофори, огороження, повна розмітка	- комплект знаків, світлофори, пішохідні переходи, острівці; - дорожні бар'єри на небезпечних ділянках.	- адміністративно-правовий: державні; - функціональний: збірно-розподільчі; - техніко-експлуатаційний: III, II категорія; - ландшафтно-геоморфологічний: всі.	- модернізація шляхом додавання відеокамер, адаптивних світлофорів; - розширення бар'єрів у зонах ризику; - реконфігурація смуг (наприклад, звуження для зниження швидкості).	в містах та міжміських дорогах, рідше на національних та міжнародних дорогах.
E3	інтелектуальні транспортні системи (ITS), відбійники, шумозахист	- камери контролю швидкості, змінні табло, детектори інтенсивності потоків; - бетонні або металеві відбійники, шумові екрани.	- адміністративно-правовий: міжнародні - функціональний: магістральні - техніко-експлуатаційний: I-б, I-а категорія	- динаміка зростання технологічного оснащення: регулярне оновлення камер, впровадження інтелектуальних систем; - зміна геометрії систем шумозахисту відповідно до показників урбанізації та зростання інтенсивності руху.	на автомагістралях, у містах на найбільш завантажених артеріях.

На оглядових і дрібномасштабних картах такі компоненти зазвичай узагальнюються до рівня умовних позначень, які вказують на ступінь технічної організації руху на магістралях, автомагістралях або дорогах місцевого значення. У такому форматі важливо фіксувати саме динаміку переходу від одного рівня безпеки до іншого – наприклад, від базової розмітки (E1) до повного комплексу регулювальних засобів (E2), а далі – до інтелектуальних транспортних систем (E3).

Такі трансформації відображають не лише технічний прогрес, а й потребу у підвищенні рівня безпеки у відповідь на зростання транспортного навантаження, зміну нормативної бази чи урбанізаційний тиск. Відстеження цих змін у ГІС-системах дозволяє оперативно оновлювати дані та планувати майбутні інженерні рішення, зберігаючи баланс між доступністю, керованістю та безпекою руху.

У таблиці 1.10 узагальнено частину геоінженерних компонентів, що забезпечують адаптацію дорожньої мережі до складних природних умов – болотистих місцевостей, заплав, гірських схилів і карстових зон. На великомасштабних картах ці елементи важливо позначати детально, оскільки вони безпосередньо впливають на інженерну безпеку та експлуатаційні характеристики доріг.

Таблиця 1.10

Групи компонентів геоінженерних елементів в ландшафтах

ID	Назва	Ключові параметри	Варіанти (у різних підходах до класифікацій)	Просторово-часові особливості	Де зустрічається
1	2	3	4	5	6
F1	заплавні конструкції (насипи на палях, дренаж тощо)	- палі, естакади через болотисті ділянки; - дренаж і насипи підняті над рівнем води.	- ландшафтно-геоморфологічний: заплавні; - адміністративно-правовий: всі; - функціональний: всі; - техніко-експлуатаційний: всі.	- періодичний технічний контроль палей та дренажних систем; - поступове підвищення насипів у зв'язку з динамікою паводків;	характерне для доріг через низинні, болотисті райони, прибережні зони.

Продовження таблиці 1.10

1	2	3	4	5	6
F1	заплавні конструкції (насипи на палях, дренаж тощо)			- динаміка посилення укріплень у разі зміни гідрологічних умов.	
F2	схилів та серпантинні укріплення	- підпірні стінки, ярусні берми, лотки для відведення води.	- ландшафтно-геоморфологічний: схилів, гірські; - адміністративно-правовий: всі; - функціональний: всі; - техніко-експлуатаційний: всі.	- зміна стійкості схилів унаслідок ерозійних процесів; - динаміка руйнування та реконструкції підпірних елементів; - відстеження потреби в оновленні при повторних зсувах.	у гірських районах, на під'їздах до перевалів.
F3	надзаплавно-терасові та вододільні споруди	- невеликі насипи, канави; - невеликі мости.	- ландшафтно-геоморфологічний: надзаплавні тераси, вододіли; - адміністративно-правовий: всі; - функціональний: всі; - техніко-експлуатаційний: всі.	- поступове руйнування терас і споруд під впливом злив чи водотоків; - хід модернізації водовідвідних систем у відповідь на сезонне підтоплення.	часто на слабохвилястому рельєфі, поза глибокими долинами.
F4	останцево-вододільні, товтрові	- сожливі виїмки у скельних породах, карстові зони; - туристичні панорами, інколи лавинозахист (високі схили).	- ландшафтно-геоморфологічний: останцеві та товтрові; - адміністративно-правовий: всі; - функціональний: всі; - техніко-експлуатаційний: всі.	- періодичні зміни геоморфології через прояв карстових процесів; - фіксація динаміки ерозії або нових загроз (обвали, зсуви); - проектування нових конструкцій у відповідь на зміну рельєфу (C4 або C5).	подільські товтри, крейдяні та вапнякові хребти, останцеві височини.

Доцільно відображати не лише фізичні параметри конструкцій (насипи, підпірні стінки, водовідвідні канали), а й просторову прив'язку до небезпечних природних явищ – зсувів, ерозій, паводків. Натомість на дрібномасштабних картах застосовуються узагальнені позначення, що сигналізують про складність ландшафту або наявність підвищеного інженерного навантаження (наприклад, «серпантин», «гірський проїзд», «дамба»).

Просторово-часова динаміка цих елементів є критично важливою для управління ризиками. Зміни в інтенсивності паводків, сезонне зволоження ґрунтів, зсувні чи карстові процеси вимагають модернізації, технічного обстеження або переобладнання об'єктів. Такі оновлення, як нарощування дамб, зміцнення схилів, прокладання нових дренажних каналів – повинні фіксуватись у ГІС і враховуватись при оновленні картографічних моделей, щоб забезпечити актуальність і точність просторових рішень.

Кожен класифікаційний підхід та кожна властивість ПЧС передбачають специфічні вимоги до картографування: адміністративно-правовий та функціональний підходи формують основу для тематичних карт (наприклад, відображення доріг державного чи регіонального значення), техніко-експлуатаційний критерій вимагає високої точності відображення якості покриття, категорій доріг, кількості смуг, допустимих швидкостей, а ландшафтно-геоморфологічний аспект потребує детальних шарів природних умов.

Водночас ієрархічність та динаміка визначають, наскільки детально і повно потрібно відображати ПЧС, якими методами доцільно показувати періодичну зміну навантаження. Сучасні ГІС-платформи дозволяють інтегрувати всі ці параметри, створюючи багат шарові й анімовані геоінформаційні моделі, придатні як для стратегічного планування, так і для короткотермінового управління рухом.

Висновки до першого розділу

Ретроспективний аналіз еволюції уявлень про простір і час показав, що автомобільні дороги можуть розглядатись як динамічні просторово-часові структури, чутливі до природних і антропогенних чинників. У цьому контексті у першому розділі:

1. Проведено декомпозицію просторово-часових структур автомобільних шляхів за різними підходами з визначенням просторових особливостей і проявів часових змін, а також здійснено класифікацію компонентів, які вже відображаються на картах, можуть бути відображені в найближчій перспективі або мають відображатися, проте наразі це ускладнено через відсутність технічних можливостей.

2. Для їх формалізованого опису запропоновано систематизовані переліки елементів на основі декомпозиції класифікацій, у межах яких виділено шість взаємопов'язаних груп компонентів: лінійні сегменти (лінійні відрізки дороги), вузлові об'єкти, штучні споруди, об'єкти інфраструктури обслуговування, системи управління й безпеки, а також геоінженерні елементи в ландшафтах.

3. Повнота відображення залежить від наявності атрибутивних даних. Сформована методична схема описує дороги як просторово-часові структури, визначає межі їх картографічної видимості залежно від масштабу та джерел даних і створює підґрунтя для подальшого експериментального порівняння точності візуалізації автомобільних шляхів на основі різних технологій та за допомогою різних онлайн-платформ.

Результати проведених наукових досліджень, викладених у першому розділі, опубліковані у наукових працях автора [12].

РОЗДІЛ 2. СУТНІСТЬ, ОСОБЛИВОСТІ І ДОСВІД КАРТОГРАФУВАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ ШЛЯХІВ

Перехід до цифрового середовища спричинив появу геоінформаційного картографування – програмно-керованого укладання й використання карт на основі ГІС і баз географічних знань [6, с. 29, 79]. У цьому контексті дані репрезентуються крізь призму моделі даних, тобто цифрового опису множини просторових об'єктів, що відображає концептуальне представлення реального світу в базах даних [6, с. 30].

Геоінформаційне моделювання охоплює побудову таких моделей і їх аналіз для вивчення об'єктів реального світу; у ГІС це означає, що кожен графічний об'єкт пов'язаний із таблицями бази даних, а будь-яке перетворення графіки зумовлює перетворення атрибутивної інформації [6, с. 32–35]. Відповідно модель трактується як образ об'єкта, що за певних умов замінює його й слугує розв'язанню конкретних задач, за умови змістовної відповідності, цілеспрямованості, об'єктивності та зручності використання [5, с. 340]. Коли таку модель реалізовано у вигляді картографічного твору, вона набуває властивостей картографічної моделі – просторово-часової подібності, математичної обґрунтованості та оглядовості, поєднаних із метричністю й наочністю, притаманними карті [5, с. 341]. Картографічне моделювання розглядаємо як творчий процес, що послідовно охоплює побудову моделі системи-оригіналу, дослідження характеристик моделі та екстраполяцію отриманих знань про сам об'єкт, збагачуючи його зміст [5, с. 340].

Картографічна візуалізація – це відображення перетвореної в графічну форму цифрової інформації засобами машинної графіки [5, с. 76]. Як елемент ГІС-аналізу вона надає інтегральне уявлення про просторові закономірності й слугує потужним засобом дослідження динаміки явищ та процесів [6, с. 52–54]. Окремий підвид становить анімаційне картографування – напрям оперативного геоінформаційного картографування, що реалізує динамічну послідовність кадрів і створює під час демонстрації ілюзію руху [6, с. 26]. З огляду на це доцільно розрізняти аналогову картографічну інформацію, подану графічно чи

текстово на матеріальному носії [6, с. 33], та її цифрові, інтерактивні еквіваленти, які забезпечують оновлюваність і багатошаровість відображення.

Таким чином, під картографуванням ми розуміємо цифровий або камеральний процес створення карт; під картографічною візуалізацією – відображення геопросторових даних у цифровій графічній формі для аналізу й комунікації; під картографічним моделюванням – побудову та дослідження картографічних моделей, які репрезентують реальні об'єкти й процеси у вибраному масштабі та з необхідним ступенем узагальнення. В цьому розділі дороги розглядатимуться саме як об'єкти картографічного моделювання з урахуванням їх просторово-часової структури.

2.1 Автомобільні шляхи як об'єкт картографічного моделювання

Протяжність доріг з твердим покриттям в Україні за останні десятиліття постійно зростає, з'являються об'їзні шляхи, міжнародні коридори, логістичні центри тощо [32]. Мережа автомобільних доріг має певну експлуатаційну динаміку, яка залежить від інтенсивності руху, напрямків та об'ємів перевезень. Дороги загального користування охоплюють усі регіони України, зв'язуючи між собою міста, промислові центри та інші пункти, чим забезпечують єдність господарського комплексу та підтримують територіальну цілісність і соціально-економічну інтеграцію простору.

Автомобільна дорога – лінійний антропогенний об'єкт, що після введення в експлуатацію перетворюється на складову ландшафту й окремий вид землекористування. Її поява кардинально змінює природну конфігурацію місцевості: уздовж полотна виникають особливі едафічні умови, формуються придорожні екосистеми, а транспортні коридори полегшують міграцію біологічних видів і поширення ресурсів [55; 105]. Оскільки мережа шляхів прокладається у різних фізико-географічних зонах, вона інтегрується в локальні геосистеми й комплексно впливає на їхні компоненти [102; 105].

Як інженерна споруда дорога включає дорожнє полотно, укріплені узбіччя, кювети, насипи чи виїмки, штучні споруди (мости, шляхопроводи), дренажні елементи та водовідвідні труби, утворюючи складні парагенетичні

системи із навколишнім середовищем [10]. Непроникне покриття порушує інфільтрацію, концентруючи поверхневий стік; за відсутності належних гідротехнічних рішень це особливо загострює ерозійні процеси та ризики зсувів у гірських районах. Заплавні відрізки доріг часто прокладають на насипах, аби мінімізувати паводкову дію, але такі рішення потребують постійного моніторингу для збереження гідрологічного балансу.

Вздовж трас формується контрастне середовище: реагенти підвищують засоленість ґрунту, відкрита місцевість створює сухіший і тепліший мікроклімат, тому узбіччя перетворюються на вузькі «стрічкові» біотопи. Щоб обмежити поширення пилу й солей та зменшити аеродинамічні й снігові навантаження, уздовж автомагістралей висаджують захисні насадження, які водночас виконують роль біофільтрів.

Лінійність дороги розтинає колись суцільні біотопи, порушуючи горизонтальні потоки речовини й енергії, однак утворює новий тип екотопів – узбіччя, сприятливі для опортуністичних видів рослин і тварин. Таким чином, шлях одночасно виступає бар'єром і середовищем-резервуаром, що вимагає комплексного обліку при ландшафтному плануванні.

З картографічного погляду автомобільна дорога є просторово-часовою структурою зі змінними параметрами. Інтенсифікація руху, зростання маси транспортних засобів і обсягів перевезень посилюють деградаційні процеси, шумове й хімічне забруднення, загрози для фауни [49; 55; 105]. Українські ландшафтознавці наголошують, що вздовж магістралей природні компоненти практично перебудовані, а самі дороги залишаються осередками техногенного впливу [10]. Водночас вони забезпечують обмін речовиною, енергією та інформацією між частинами ландшафту [47; 104], підтримуючи функціонування територіальних систем.

Основні кількісні характеристики шляху – це протяжність, конфігурація та конструктивні параметри. Від ширини й кількості смуг залежить пропускна здатність: високошвидкісні магістралі мають кілька смуг у кожному напрямку, тоді як локальні дороги залишаються вузькими. Поздовжній профіль траси визначають ухили й висотний хід, а поперечний – кут укладення полотна та

ширину узбіч. У гірських місцевостях маршрут ускладнюють серпантини, круті підйоми й тунелі; на рівнинах переважають довгі прямолінійні відрізки. Мости, естакади й шляхопроводи інтегрують дорогу в рельєф, забезпечуючи безперервність руху через річкові долини, яри та перевали й водночас задаючи унікальні інженерні домінанти ландшафту.

З точки зору картографування автомобільні дороги можуть відображатись по-різному відповідно до контексту запиту на створення карти та цільової аудиторії. Для автомобілістів, водіїв вантажівок та сфери логістики пріоритетом є точна навігаційна інформація, що висвітлює клас дороги, дозволені напрямки руху, розв'язки, обмеження для проїзду, але особливо відстань між пунктами призначення. Паперові і цифрові карти автомобільних доріг зазвичай вирізняються чітким виділенням магістралей потовщеними кольоровими лініями, позначенням їх номерів, місць знаходження АЗС, місць відпочинку тощо. Пояснювальними знаками біля умовних позначень доріг вказують відстані відрізків основних магістралей, національних та регіональних доріг.

На туристичних картах основний акцент робиться на місцеположенні пам'яток, культурних чи унікальних природних ландшафтів, проляганні туристичних маршрутів, кемпінгів тощо. Автомобільні шляхи зазвичай позначені схематично у разі, якщо вони ведуть до туристичних об'єктів.

Карти для державних, обласних, районних адміністрацій фокусуються на інженерних характеристиках доріг, як-то: пропускна здатність, якість та матеріал покриття, прогнози розвитку мережі тощо. Такі карти можуть бути частиною містобудівної документації або ГІС-проектів, де мережа автомобільних шляхів зображена дуже детально, включаючи всі вулиці, проїзди тощо.

Особливий тип користувачів – військові та рятувальні служби – висувають підвищені вимоги до карт автомобільних шляхів. Для військових важлива не лише топологія шляхів, але й характеристика прохідності доріг для різної техніки, наявність мостів із зазначенням їх вантажопідйомності, об'їзні шляхи, вплив сезонності на них. Для рятувальних та екстрених служб критично

важливо мати оперативну обстановку на дорогах, щоб швидко знаходити оптимальний маршрут до місця події.

Тож призначення карти і коло користувачів визначають рівень деталізації відображення просторово-часових структур автомобільних шляхів, його спосіб та специфіку. Якщо для туриста головне – наочність і цікаві об'єкти вздовж дороги, то для водія – чіткі вказівки поворотів, розв'язок та дистанції, а для спеціальних служб – прохідність та альтернативні маршрути. Карта має враховувати ці потреби, що закладаються на етапі проектування, відбираючи відповідні елементи та застосовуючи необхідні умовні позначення.

У нашому дослідженні було вирішено абстрагуватись від призначення карт, їх контексту, специфічного змісту і тематики, та розглядати ПЧС автомобільних шляхів як об'єкт, що має два основних геометричних параметри – ширину та довжину.

Традиційно при картографуванні пропонується розглядати дорогу через призму лінійного умовного знаку. У такому разі зберігається очікування, що цей картографічний знак має, як мінімум, представити геометрію траси у відповідності до реальних параметрів. Але насправді цей знак містить у собі навмисні та ненавмисні фальсифікації, які ставлять під питання метричну надійність карти. Інші аспекти фальсифікацій також були розглянуті у роботі [11].

Серед навмисних але вимушених фальсифікацій можна виділити зміщення трас через спрощення геометрії доріг при генералізації та зміну довжини автомобільного шляху через проектування дороги на плоску поверхню карти та зображенням її горизонтального прокладення. Для їх можливого усунення додаються пояснювальні знаки довжини відрізків на автомобільних шляхах різних категорій.

Ненавмисна фальсифікація, яка є очевидною – це товщина лінійного знаку дороги, яка може сприйматись як дійсна ширина дороги, хоча визначається графічними вимогами задля кращої читабельності і апріорі не може дорівнювати дійсній ширині проїзної частини (рис. 2.1). Таку похибку приймають як загальновідому і необхідну для дотримання візуальної ясності.

Другою є прихована але також ненавмисна фальсифікація, коли довжина лінії дороги на карті, що вважається відтворюваною у масштабі, насправді не дорівнює дійсній довжині. Наведені приклади не є вичерпним переліком фальсифікацій але є найбільш важливими у нашому контексті. Шляхом проведених досліджень розрахунків довжин сегментів доріг були зафіксовані відхилення (як позитивні, так і негативні) 3–20% між картометричною та реальною протяжністю, що ставить під сумнів твердження про те, що довжина на картах передається точно та у відповідності до реальної довжини [20].

Масштаб карти, як відомо, впливає на вибір способів відображення елементів навколишнього середовища, зокрема автомобільних доріг. На великомасштабних картах дороги можуть бути показані деталізовано включно із зображенням частини декомпонованих елементів (розділ 1, таблиці 1.6–1.10). Але відображення всіх елементів та всіх параметрів структур фактично неможливо виконати, коли мова йде про традиційну картографічну візуалізацію і паперовий формат. Відображення на дрібномасштабних картах елементів автомобільних шляхів зводиться до мінімуму, бо більшість деталей вважаються другорядними, через що на такій карті залишаються картографічні образи головних міжнародних магістралей і національних доріг.

Через генералізацію при класичному підході розглядати картографування автодороги слід від найкрупнішого масштабу, а потім переходити до дрібніших. У разі використання ГІС користувачеві стають доступні функції мультимасштабності та алгоритмічної деталізації й генералізації. Обраний користувачем масштаб викликає відображення відповідного цифрового тематичного шару для візуалізації, який містить деталізовані або спрощені графічні образи відповідних елементів просторово-часових структур автомобільних доріг.

Зі сказаного вище випливає, що можливості і обмеження традиційного картографування і використання паперових карт, та геоінформаційного картографування і цифрових карт відрізняються. Але враховуючи переваги та недоліки кожного з підходів проблема точного моделювання автомобільних шляхів залишається.

У аспекті деталізації та мультимасштабного представлення ГІС-технології мають значні переваги перед аналоговими картами, які завжди обмежені вибраним масштабом і роздільною здатністю друку, тому дрібні деталі неминуче втрачаються. Динамічність є другою ключовою відмінністю. Паперова карта фіксує стани об'єкту на момент збирання просторових даних, коли цифрові геопросторові дані постійно оновлюються доходячи до рівня оновлення наживо. Інший аспект – аналітика, де при класичному картографуванні тематика карти та її зміст визначає межу можливостей та обмежує ширину аналізу, а електронна карта у геоінформаційному середовищі інтерактивна і користувач може запитати маршрут, прорахувати довжини, площі, побудувати профіль висот по дорозі, проаналізувати, які населені пункти опиняться в зоні досяжності 30-хвилинної поїздки від даної точки, навіть якщо початкова тематика не збігається із цими запитами. Звичайно, ці досягнення не означають, що традиційна картографія відмирає. Навпаки, сучасна картографія є синтезом: паперові і електронні карти доповнюють одна одну. Паперова карта не вимагає живлення, до того ж дає відчуття простору та гарантує стабільність зображення, а з іншого боку електронні карти економлять час і зусилля, бо при використанні ГІС будь-які правки автоматично відображаються на карті. Програмне забезпечення ГІС хоч і вирішує питання детальності, все ж питання точності залишається відкритим.

Оманливе відчуття картографічної точності графічного образу та його відповідності реальним параметрам передається користувачам різних галузей через фальсифікацію ненавмисно. Водночас вона лишається непоміченою та обертається зайвими кілометрами, перевитратою пального, підвищеною частотою ремонтних робіт, неправильними прогнозами заторів тощо. Причинами цього є як природні так і технологічні фактори.

2.2 Особливості картографічного відображення автомобільних шляхів в Україні і світі

Візуалізація автомобільних доріг у процесі картографування – це найбільш уніфіковане завдання. Базове графічне зображення дороги – це

обов'язково лінійний знак, який має початок, кінець, ширину, довжину. Це знак, довжина якого вважається масштабною, а ширина позамасштабною. У такому разі при відповідності положення всіх точок знаку та реальних точок на земній поверхні користувач має отримати відповідність довжин прокладеного шляху за картою та цього шляху на місцевості.

Для перевірки цієї гіпотези було вирішено порівняти офіційну довжину дороги та довжину її картографічного образу. Основними критеріями вибору доріг були наступні: 1) відносна віддаленість від столиць країн, 2) дорога має бути частиною системи автомагістралей, 3) дорога має значення для автомобільних перевезень, 4) наявність офіційних даних довжини відрізка чи всієї дороги.

Геологічна служба США (United States Geological Survey або USGS) на своєму сайті [139] надає доступ до інтерактивних топографічних карт із функцією вимірювання відстані прокладеного маршруту. Прокладення маршруту за координатами відсутнє. Довжина ділянки траси I-75 у межах штату Теннессі за офіційними документами складає 260,49 км [126]. Його довжина згідно із прокладеним маршрутом на геопорталі складає 256,39 км (рис. 2.1).

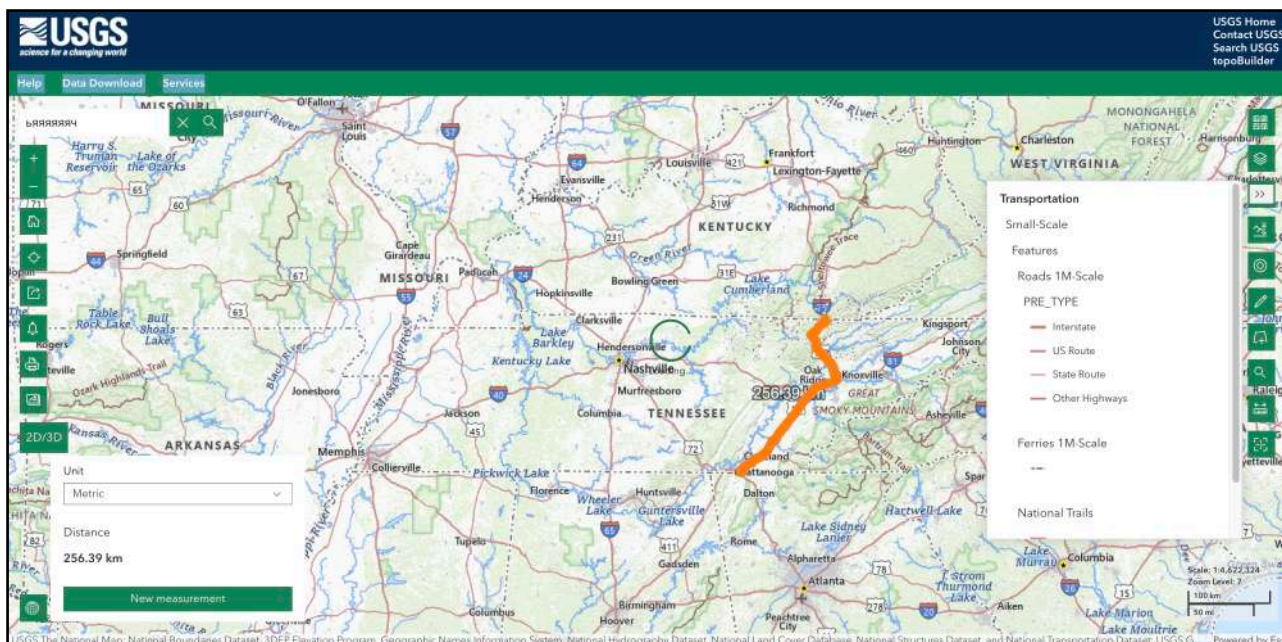


Рисунок 2.1 – Інтерфейс геопорталу США. Кольором виділено частину траси I-75 у межах штату Теннессі спільно із вирахованим горизонтальним прокладенням та легендою.

Геопортал Німеччини надає безкоштовний вільний доступ до великої кількості картографічного та цифрового матеріалу, включно із цифровою картою та цифровою моделлю рельєфу [119]. Функціонал дозволяє прокладати маршрут за координатами чи обираючи точки на карті, а також отримувати значення координат точки у різних системах координат. Для порівняння точності довжин було обрано автобан А2 (рис. 2.2), офіційна довжина якого складає близько 473 км [128]. Згідно із розрахунками за геопорталом його довжина складає 473,1 км.

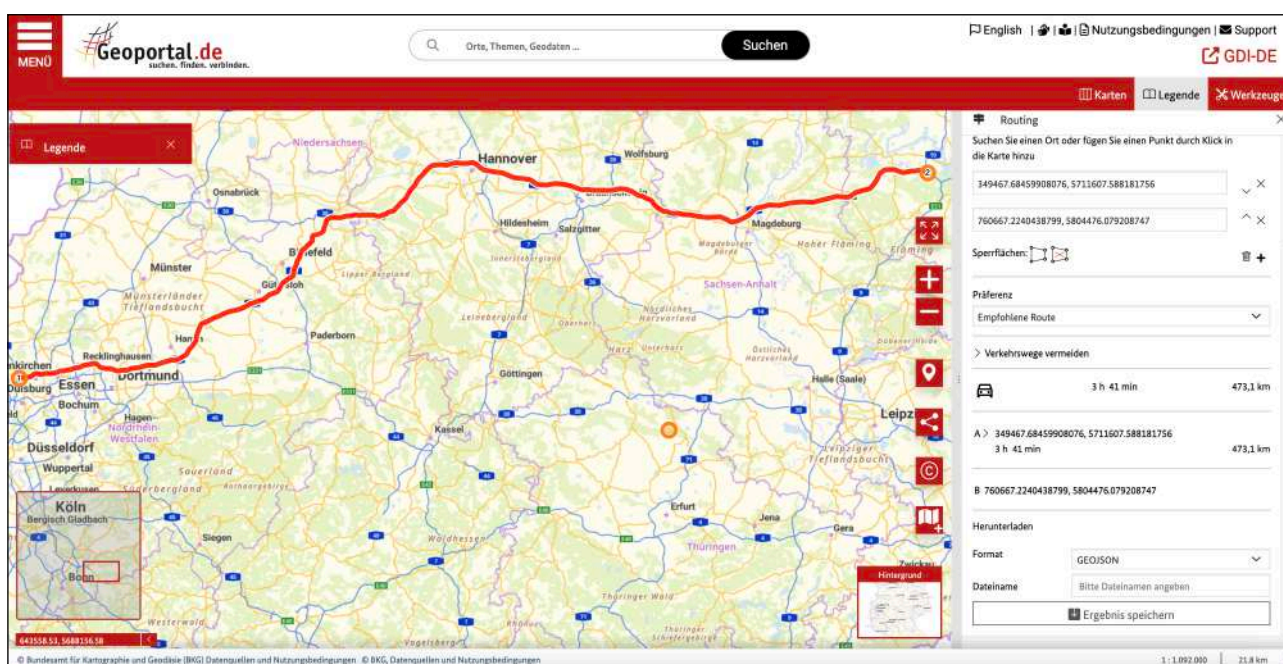


Рисунок 2.2 – Інтерфейс геопорталу Німеччини. Кольором виділено автобан А2 зі значенням довжини прокладеного маршруту.

Геопортал Франції також є безкоштовним для користувачів, дозволяє користуватись великим переліком доступних цифрових та оцифрованих карт, а також прокладати маршрути за координатами [117]. До прикладу було взято автомагістраль А7, офіційна довжина якої складає 305 км [116], а згідно із геопорталом – 305,6 км (рис. 2.3).

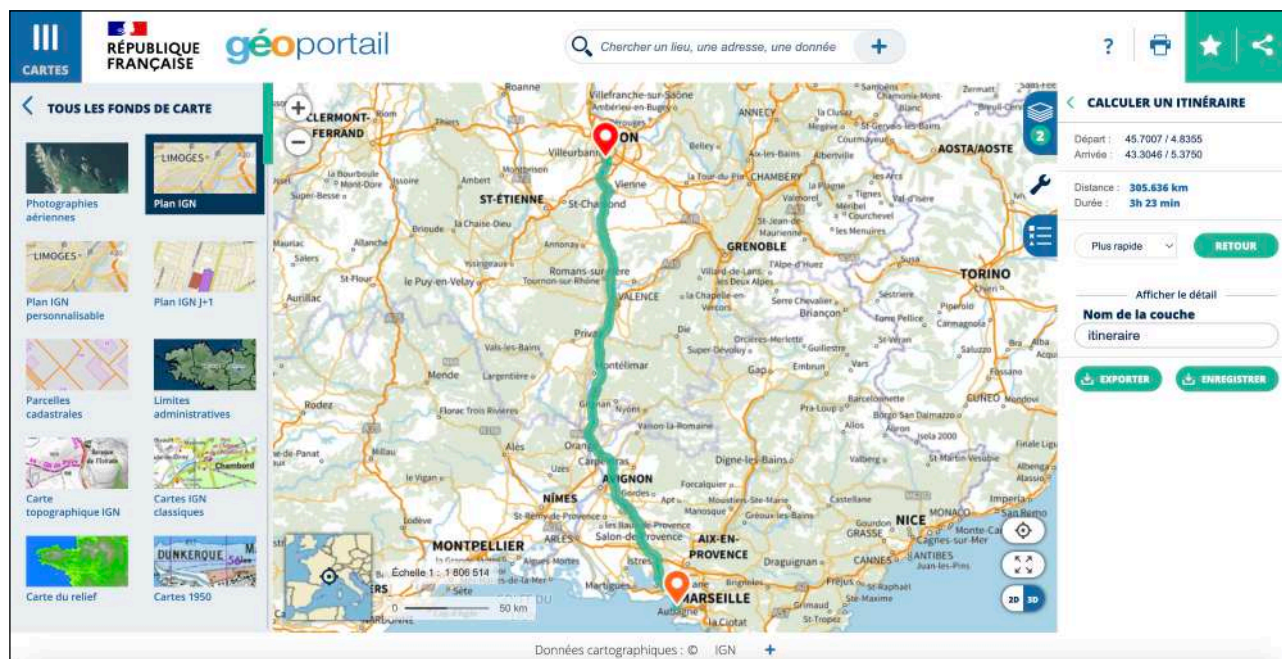


Рисунок 2.3 – Інтерфейс геопорталу Франції. Кольором виділено автомагістраль А7 із значенням горизонтального прокладення праворуч.

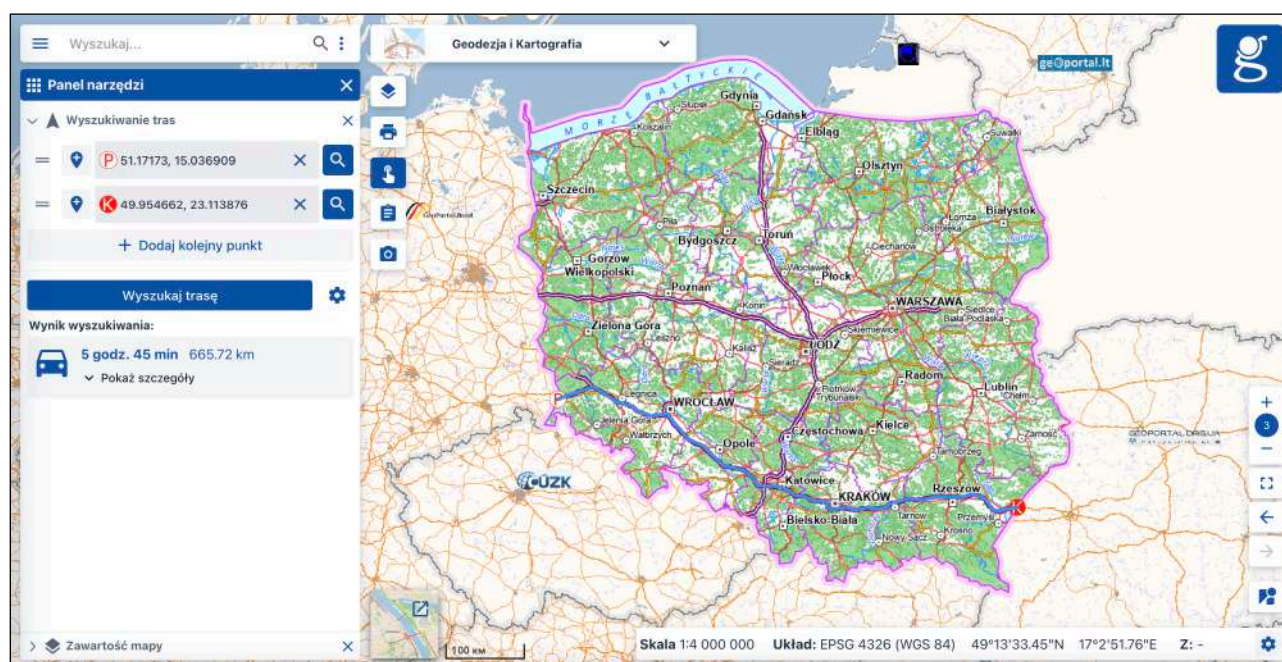


Рисунок 2.4 – Інтерфейс геопорталу Польщі. Кольором виділено автомагістраль А4. На панелі ліворуч вказано її горизонтальне прокладення (відрізок біля західної точки початку не враховано через помилки в топології).

Геопортал Польщі дозволяє безкоштовно користуватись великим переліком доступних цифрових та оцифрованих карт, а також прокладати

маршрути за координатами різних систем координат чи перетягуючи маркер у потрібне місце [118]. До прикладу було взято автомагістраль А4, офіційна довжина якої складає 667 км [125]. Через неможливість прокласти маршрут від західного кордону по цій автомагістралі ми не могли отримати коректну довжину, тож невелику частину маршруту було виміряно за допомогою лінійки (рис. 2.4, 2.5). Так, довжина маршруту по автомагістралі А4 на геопорталі склала 667,96 км.

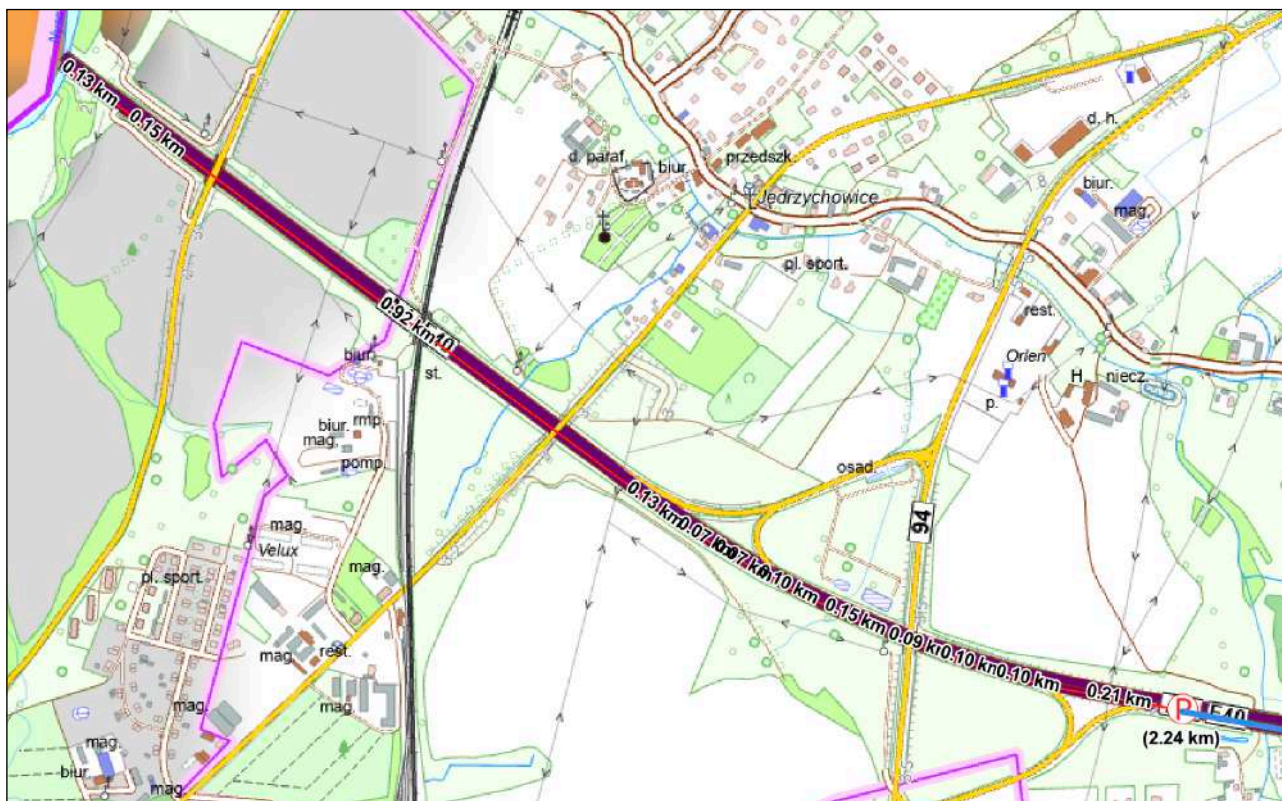


Рисунок 2.5 – Ділянка біля західної точки початку автомагістралі А4, виміряна за допомогою лінійки через помилки в топології.

Геопортал Канади надає безкоштовний доступ до перегляду картографічних даних, але функціонал для розрахунку маршруту за координатами відсутній [101]. Як і у геопорталі США відстань треба вимірювати лінійкою прокладаючи маршрут вручну. Для прикладу було розраховано довжину частини автомагістралі 401 (Macdonald-Cartier Freeway) у межах муніципалітету Четем-Кент між перехрестями Chatham Kent Rd 2 Queen's Line IC-63 та Chatham Kent Rd 20 Orford Rd IC-117, довжина між якими

за офіційними джерелами складає 53,4 км [82]. Довжина цього відрізка за розрахунками на геопорталі склала 51,55 км (рис. 2.6).

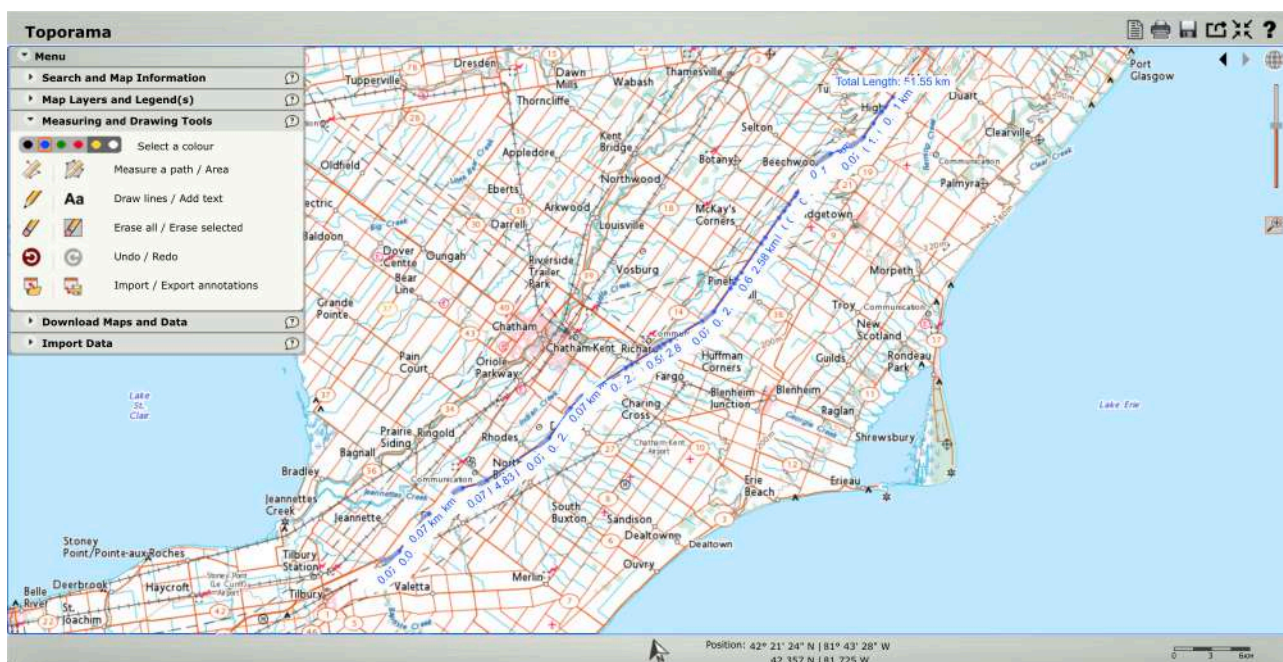


Рисунок 2.6 – Інтерфейс геопорталу Канади. Кольором виділено ділянку автомагістралі 401 із фіксуванням довжини.

Геопортал Великої Британії пропонує користування генералізованою електронною картою після проходження реєстрації (рис. 2.7) [130].

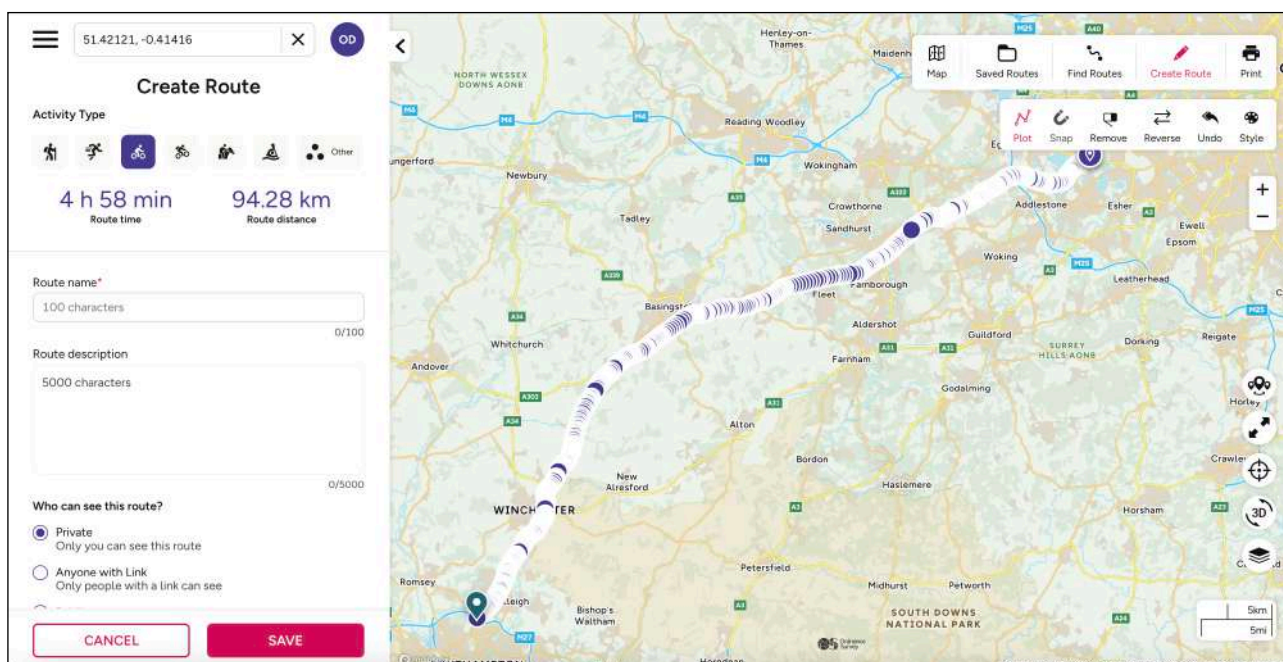


Рисунок 2.7 – Інтерфейс геопорталу Великої Британії. Кольором виділено автомагістраль M3 із фіксуванням її горизонтального прокладення.

Можливо придбати підписку, яка надає доступ до шару із відсканованими топографічними картами 1:25 000 високої деталізації. Для прикладу і проведення розрахунків нами було обрано автомагістраль М3, довжина якої складає 59 миль або близько 94,95 км [106]. Довжина за розрахунками на геопорталі складає 94,28 км.

Геопортал України на період воєнного стану надає користувацький доступ тільки через індивідуальний запит. Автором було отримано доступ до розділу «Державний облік топографо-геодезичних і картографічних робіт», який містить візуалізацію електронної карти території України із можливістю вимірювання довжини маршруту [112]. Після отримання доступу користувач може вимірювати відстань одного маршруту, але прокладання маршрутів за координатами із автоматичним визначенням відстані наразі немає. Для прикладу було обрано автодорогу М-22, довжина якої згідно офіційного переліку складає 148,2 км [28], а за розрахунками на геопорталі складає 165,1 км (рис. 2.8).

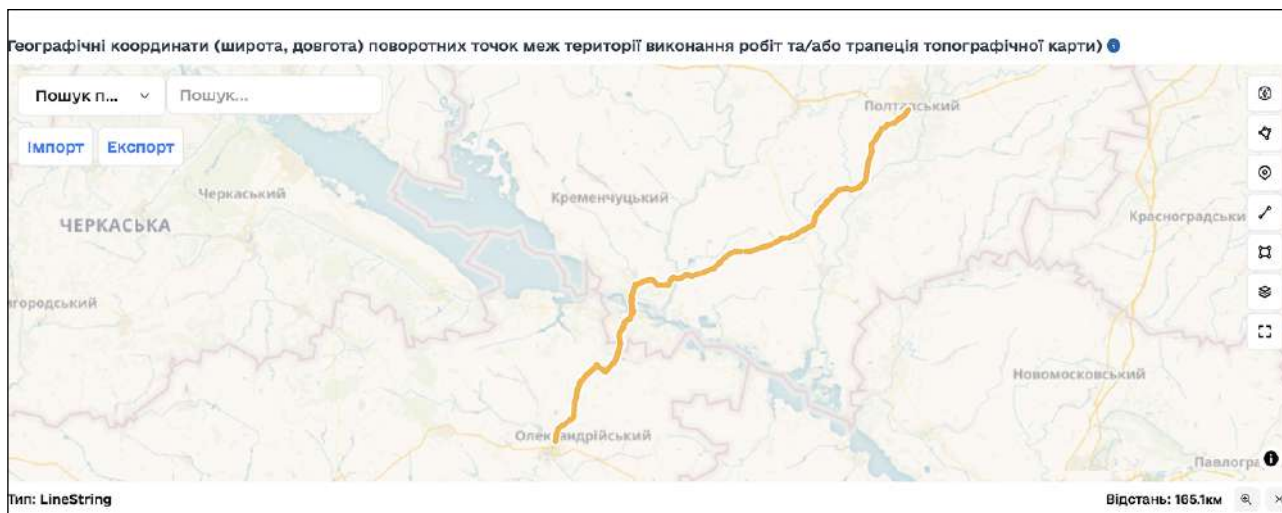


Рисунок 2.8 – Інтерфейс розділу «Державний облік топографо-геодезичних і картографічних робіт» геопорталу України. Кольором виділено ділянку автомагістралі М-22 за значенням довжини прокладеного маршруту.

Для порівняння відповідності даних довжин автомагістралей, чи їх відрізків, офіційним даним у таблиці 2.1 представлено результати розрахунків

розбіжності. Координати початкової (ϕ_1, λ_1) та кінцевої точки (ϕ_2, λ_2) подано в системі WGS 84:EPSG 4326 в десяткових градусах. Відсоток відхилення значення довжини, розрахованого за даними національного геопорталу, відносно офіційного значення розраховано за формулою:

$$\Delta L_1 = \frac{L_{\text{нац.гео.}} - L_{\text{офіц.}}}{L_{\text{офіц.}}} \times 100 \% \quad (2.1),$$

де: $L_{\text{нац.гео.}}$ – значення довжини дороги, розрахована за даними національного геопорталу;

$L_{\text{офіц.}}$ – офіційні дані довжини автомагістралі або її частини.

Відсоток відхилення значення довжини, розрахованого за даними GM, відносно офіційного значення розраховано за формулою:

$$\Delta L_2 = \frac{L_{\text{GM}} - L_{\text{офіц.}}}{L_{\text{офіц.}}} \times 100 \% \quad (2.2),$$

де: L_{GM} – значення довжини дороги, розрахована за даними GM;

$L_{\text{офіц.}}$ – офіційні дані довжини автомагістралі або її частини.

Відсоток відхилення значення довжини, розрахованого за даними OpenStreetMap, відносно офіційного значення розраховано за формулою:

$$\Delta L_3 = \frac{L_{\text{OSM}} - L_{\text{офіц.}}}{L_{\text{офіц.}}} \times 100 \% \quad (2.3),$$

де: L_{OSM} – значення довжини дороги, розрахована за даними OSM;

$L_{\text{офіц.}}$ – офіційні дані довжини автомагістралі або її частини.

Аналіз співставлення офіційних протяжностей автомобільних доріг із величинами, отриманими за даними національних геопорталів, GM і OSM, засвідчує загалом високу метричну узгодженість для більшості розглянутих країн, як видно із таблиці 2.1. Зокрема, для автобанів A2 у Німеччині та A4 у Польщі розбіжність не перевищує $\pm 0,02\%$. Для французької A7 та британської

МЗ відхилення знаходяться в межах $\pm 0,3\%$ і $\pm 1\%$ відповідно, що можна вважати статистично несуттєвим, але на великих дистанціях може викликати більш суттєві розбіжності для бюджету з позиції навігаційних і логістичних потреб.

Таблиця 2.1

Порівняння офіційних довжин деяких автодоріг або їх частин із прокладеними по них маршрутами за електронними картами національних геопорталів

Країна, дорога або її частина	$\phi_1, \lambda_1;$ ϕ_2, λ_2	$L_{\text{офіц}},$ км	$L_{\text{нац.гео.}},$ км	$L_{\text{GM}},$ км	$L_{\text{OSM}},$ км	$\Delta L_1, \%$	$\Delta L_2, \%$	$\Delta L_3, \%$
США, частина I-75 у межах штату Теннессі *	34.985836, -85.201377; 36.591082, -84.104623	260,49	256,39	256,12	256,3	-1,57	-1,68	-1,61
Канада, частина автомагістралі 401 у межах муніципалітет у Четем-Кент *	42.279195, -82.374526; 42.517301, -81.830263	53,4	51,55	53,2	53	-3,46	-0,37	-0,75
Німеччина, автобан А2 *	51.537222, 6.834722; 52.328333, 12.826667	473	473,1	473	473	0,02	0%	0%
Франція, автомагістраль А7	45.700648, 4.835504; 43.304628, 5.374951	305	305,6	306	306	0,2	0,33	0,33
Велика Британія, автомагістраль М3 *	51.42121, -0.41416; 50.95365, -1.40322	94,95	94,28	94,14	94	-0,71	-0,85	-1,00
Польща, автомагістраль А4*	51.171730, 15.036909; 49.954662, 23.113876	667	667,96	668	668	0,14	0,15	0,15
Україна, автодорога М-22 *	49.560093, 34.524616; 48.691858, 33.111374	148,2	165,1	165	165,1	11,4	11,34	11,40

* координати визначено автором за даними картографічних онлайн сервісів, враховуючи топографічні карти національних геопорталів, через відсутність відкритого згадування про координати в офіційних джерелах

Для ділянки автомагістралі I-75 у штаті Теннессі (США) всі альтернативні джерела дають довжину приблизно на 1,6% меншу, ніж офіційно задекларовано.

Для ділянки автомагістралі 401 у муніципалітеті Четем-Кент (Канада) різниця між GM, OSM та офіційними даними не перевищує 1%, проте значення, розраховане за геопорталом показує відхилення $-3,5\%$.

Найбільшу диспропорцію виявлено для траси М-22 в Україні: усі три незалежні обчислення стабільно перевищують офіційну довжину на $\approx 11,4\%$.

Тобто на міжнародному рівні офіційні показники здебільшого забезпечують прийнятну точність для інженерного планування та транспортного моделювання, але Україна становить виняток, де величина систематичної похибки є критичною і може призводити до хибних логістичних розрахунків та недооцінки витрат ресурсів. Для більш ґрунтовного аналізу нами були проведені додаткові розрахунки, що представлені у третьому розділі.

Всі розглянуті веб-геопортали та онлайн картографічні джерела у правилах та умовах їх використання вказують, що дані, маршрути й виміряні відстані надаються «як є», тобто їх точність, повнота й актуальність не можуть гарантуватися, а користувач використовує їх на власний ризик. Для інженерних, наукових або інших розрахунків користувачеві рекомендується виконувати власні точні вимірювання.

У кожному з розглянутих національних геопорталів у документації з використання вказано, що вимірювання довжини маршруту відбувається без координати висоти, тобто користувач бачить довжину горизонтального прокладення, а не реальної відстані на місцевості.

Наступним кроком ми вирішили з'ясувати, чи існують відмінності у графічному відображенні автомобільних доріг, для яких виявлено суттєві розбіжності між офіційною та фактично виміряною довжиною, порівняно з дорогами, довжина яких збігається з нормативними даними. Як видно із таблиці 2.2, одночасно перевірялося, чи кожен елемент картографічної символіки супроводжується адекватним поясненням у легенді, аби виключити семантичну неоднозначність умовних позначень.

Таблиця 2.2

Порівняння графічного зображення автодоріг на топографічних картах різних країн

Країна	Джерело	Умовний знак	Пояснення до умовного знаку	
			Група в переліку знаків	Пояснення до символу
1	2	3	4	5
Німеччина	ATKIS-Signaturenkatalog [113]		Федеральна автомагістраль	Не розділена
				Має окремі проїзні частини
			Державна дорога або національна дорога	Не розділена
				Має окремі проїзні частини
			Районна дорога	Не розділена
				Має окремі проїзні частини
США	USGS Topographic Map Symbols (усі масштаби) [97]		Головна автомагістраль	
			Другорядна автомагістраль	
			Автомагістраль або дорога з роздільною смугою	
Франція	IGN Signes conventionnels [75]		Головна автомагістраль	з двома розділеними проїзними частинами
				дві широкі смуги й більше
				дві вузькі смуги
			Другорядна автомагістраль	з двома розділеними проїзними частинами
				дві широкі смуги й більше
				дві вузькі смуги

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5
Франція	IGN <i>Signes conventionnels</i> [72//]		Некласифікована	з двома розділеними проїзними частинами
				дві широкі смуги й більше
				дві вузькі смуги
Польща	<i>Instrukcja techniczna K-2 / Каталог знаків (1 : 10 000 – 1 : 50 000) [71]</i>		Автомагістраль	
			Швидкісна дорога з розділеними проїзними частинами (двох'ярусна)	
			Дорога з твердим покриттям шириною понад 7 м	
			Дорога з твердим покриттям шириною від 3 до 7 м	
			Дорога з укріпленим покриттям або дорога з твердим покриттям шириною менше 3 м	
Канада	<i>CanTopo Map Standards 1 : 50 000 (NTS) + пам'ятка Topographic Maps – The Basics [95]</i>	.60 	Дорога А: тверде покриття, більше 2 смуг руху	Всесезонна дорога з роздільною смугою або без неї
		.45 	Дорога В: тверде покриття, 2 смуги	Всесезонна дорога

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5
Канада	<i>CanTopo Map Standards 1 : 50 000 (NTS) + пам'ятка Topographic Maps – The Basics [95]</i>	 .25	Дорога С: тверде покриття, менше 2 смуг руху	Тверда дорога, всесезонна, основна функція – це забезпечення доступу для видобутку ресурсів
		 .45	Дорога D: пухке покриття, 2 смуги руху або більше	Стабілізована поверхня, всесезонна дорога
		 .35	Дорога E: пухке покриття, менше 2 смуг руху	Всесезонна дорога
		 .25	Дорога F: пухке покриття, суха погода	Підходить для використання лише в суху погоду
Велика Британія	<i>Ordnance Survey 50k Raster Legend / Explorer Legend [131]</i>		Автомагістраль (з двостороннім рухом)	
			Основні шляхи	Транзитні маршрути, що доповнюють систему автомагістралей
			Головна дорога	
			Другорядна дорога	
			Дорога більше 4 м завширшки	
			Дорога менше 4 м завширшки	
			Інша дорога, під'їзд або проїзд	

Продовження таблиці 2.2

1	2	3	4	5
Україна	«Умовні знаки для топографічних карт 1 : 10 000» (державний стандарт) [37]		Автомагістраль	
			Дорога з удосконаленим покриттям	
			Дорога з покриттям	
			Дорога без покриття (покращена ґрунтова дорога)	

В інструкціях до знаків топографічних карт містяться пояснення, що контроль довжини лінійних об'єктів має відбуватись згідно із лінійним масштабом, також згадується точність масштабу і відповідна можлива похибка. Основний акцент зроблено на класифікаційній ознаці, яка передається кольором та типом лінії графічного образу дороги, а вимірювання відстані має відбуватись самостійно користувачем.

Щодо України, то у методичних вказівках зазначено, що довжину можна виміряти за картою, а ширину – ні, при цьому точне положення відповідає середині самого знака, а отже позиційна точність має зберігатись, що дає підстави вважати, що довжина також буде відповідати дійсній [39].

Важливо зауважити, що робіт за темою картографічної точності не так багато. Доволі широко ця тема представлена у роботі С. В. Тітової та Т. В. Дудун, де вказується, що внаслідок протиріччя при застосуванні генералізації прийоми аналізу, які потребують високої точності ефективні тільки для тих карт, де генералізація мінімальна. Тож при мінімальній генералізації на картах помилки у визначенні довжин і площ не повинні перевищувати 1% [36, с. 47].

У нашому випадку умова виконується тоді, коли порівнюють довжини горизонтальних проєкцій реальних маршрутів із довжинами їхніх графічних

образів на карті. Водночас вона часто порушується, якщо зіставляти вимірю на електронній карті довжину лінійного об'єкта з його фактичною довжиною на місцевості.

З огляду на стрімкий розвиток геодезичних технологій – насамперед лазерного сканування, ГІС і сучасного програмного забезпечення – сучасні картографічні продукти можна створювати не лише швидше, а й підвищити їх точність до сотих часток відсотка, зокрема точність вимірювання довжин лінійних об'єктів [20].

Підсумовуючи можна виокремити дві головні проблеми. Першою є класична проблема самого знаку. Лінійний умовний знак у класичному розумінні не здатний відповідати реальній геометрії. Дорога на карті зображена плоскою лінією, а її довжина вимірюється як довжина проєкції цієї лінії на площину, тоді як реальна довжина дороги враховує висоту поверхні, по якій вона прокладена. Знак не може вмістити всі атрибути одночасно як-от кількість смуг, стан покриття, крутість схилів тощо, а додатково при мультимасштабному картографуванні їх звужують до загальних класів, або векторизують окремими шарами для ситуаційного додавання і запобігання інформаційному перевантаженню.

Другою проблемою є практична. Кінцеве відображення лінії залежить від багатьох факторів, які включають, але не обмежуються, різними джерелами даних, що зібрані у різні роки у різних системах координат, перехід між декількома картографічними проєкціями, використання алгоритмів генералізації для спрощення ліній, конвертування даних у різні формати, ручне редагування тощо. Кожен крок може містити неточності, які при накопиченні впливають на кінцеве значення довжини дороги, що у результаті може збільшувати чи зменшувати її довжину на десятки відсотків, залежно від того, дивимося ми на паспорт дороги, онлайн-карту чи GPS-трек. Щоб мінімізувати таку розбіжність, доцільно врахувати декілька факторів, серед яких ми виділили організаційно-регуляторні, природні і технологічні.

2.3 Фактори, що впливають на точність і формують особливості картографічної візуалізації автомобільних шляхів

З'ясувавши, що похибки картографічного подання автошляхів зумовлені, з одного боку, невідповідністю умовного знака складній тривимірній геометрії дороги, а з другого – кумулятивними втратами точності на етапах збирання, трансформування та узагальнення даних, розглянемо чинники, які безпосередньо визначають метричну точність і особливості картографічної візуалізації мережі. Для подальшого аналізу вони згруповані у три блоки: організаційно-регуляторні, природні і технологічні (рис. 2.9).

Організаційно-регуляторні	Природні	Технологічні
- стандарти (ISO, ДСТУ тощо) - освіта, компетенції, професіоналізм	- рельєф; - гідрографія; - погодно-кліматичні умови; - рослинність.	Процеси збору вихідної інформації: - геодезичні методи; - методи ДЗЗ; - GPS-вимірювання; - волонтерський збір просторових даних; - лазерне сканування
		Процеси передачі інформації - математична основа; - масштаб; - генералізація; - ГІС.

Рисунок 2.9 – Групи факторів, що впливають на точність картографічної візуалізації.

2.3.1 Організаційно-регуляторні фактори

Для будь-якого набору геопросторових даних, в тому числі цифрових карт автошляхів, дуже важливим є грамотне виконання вимог стандартів. Одним із них є стандарт ISO щодо метаданих. Метадані описують хто, коли, як і для чого створив дані, їх просторові та тематичні характеристики, якість та умови використання. Міжнародним стандартом для гео-метаданих є ISO 19115 із останнім виданням ISO 19115-1:2014, який прийнято в Україні як ДСТУ ISO

19115-1:2021. Цей стандарт визначає структуру і набір полів, значна частина яких є обов'язковими. Мінімальна інформація, необхідна для ідентифікації набору просторових даних, включає: назву набору даних, дату, відповідальних осіб, унікальний ідентифікатор, систему координат, охоплення та ключові слова [70]. Зокрема, обов'язковими є:

- Title (назва) – офіційна назва набору.
- Date (дата) – дата випуску або актуалізації даних.
- Abstract (анотація) – стислий опис змісту набору даних, його просторового покриття, призначення і особливостей.
- Responsible party (відповідальна сторона) – особа або організація, відповідальна за створення та супровід даних.
- Unique identifier (унікальний ідентифікатор) – код, що однозначно позначає набір даних.
- Spatial reference system (система координат) – зазначення використаної системи координат та проєкції наприклад, «ETRS89 / UTM zone 35N».
- Geographic extent (географічне охоплення) – просторові межі даних, зазначення прямокутних координат або опис району.
- Topic category / Keywords (тема / ключові слова) – тематична класифікація за фіксованим списком ISO та кілька ключових слів для індексування.

Стандарт ISO 19115 також містить поля для якості та придатності даних, умов використання, зв'язку з іншими ресурсами. Відповідно до ISO 19115, обов'язкові поля повинні бути заповнені, інакше метадані вважатимуться неповними. Дотримання стандартизованої схеми метаданих забезпечує інтероперабельність, щоб різні інформаційні системи змогли автоматично індексувати та інтерпретувати дані, в тому числі про дороги. Таким чином, семантичне наповнення метаданих є невід'ємною частиною методології підвищення точності карт, бо воно дає змогу зрозуміти наскільки точні та актуальні дані, як їх було отримано і як правильно ними користуватися.

Забезпечення відповідності стандартам може бути реалізоване тільки фахівцями галузі, професіоналами із відповідними знаннями та навичками.

Дотримання регламентів на високому рівні, а особливо протягом тривалого часу, має на увазі забезпечення галузі спеціалізованими кадрами вузького профілю.

Загальновідомо, що постійна зміна умов та правил призводить до втрати частини накопиченого досвіду у будь-якій галузі. Українська картографічна школа є яскравим прикладом поступового зниження потенціалу цілої галузі через постійний перегляд загального переліку галузей знань та спеціальностей, де сьогодні картографії не знайшлося окремого місця взагалі.

На міжнародному рівні питанням стандартизації в освіті займається ЮНЕСКО. Організація розглядає кожну галузь та спеціальність через гнучку призму міжнародної стандартної класифікації освіти (МСКО). Основні етапи та рекомендації зображено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Зміна місця картографії у класифікації МСКО (складено автором за [67-69])

Період	Версія МСКО	Місце картографії	Типовий код/ блок	Ключова особливість
1976–1996	МСКО-1976	Включена у географічні програми	63062 та 73062	Рекомендація об'єднувати вузькі спеціальності
1997–2010	МСКО-1997	443 «Earth Science»	443	Визнання місця картографії серед наук про Землю
2011–2012	МСКО-2011	443 «Earth Science»	443	Збереження місця картографії серед наук про Землю
2013–нині	МСКО-F 2013	0532 Earth sciences / 0731 Architecture and town planning	0532 / 0731	Деталізація підпрограм, картографія входить до декількох галузей

Перший стандарт 1976 р. розмістив картографію поряд із фізичною та економічною географією, а перегляд 1997 р. адаптував систему до нових форм навчання. У редакції МСКО-2011 було наявно 25 деталізованих галузей знань, які вміщували курси «GIS & Cartography» одночасно в блоці 0532 Earth Sciences

та 0731 Architecture & Town Planning. Редакція МСКО-F 2013 поглибила це додатковим описом кожної спеціальності.

Німецька федеративна модель управління освітою та наукою використовує декілька реєстрів, які містять переліки галузей знань та спеціальностей. Для картографії є визначене місце у двох незалежних реєстрах. У HRK вона з 2001 р. має код 280 «Kartographie» у групі «08 Engineering Sciences», а в класифікації DFG від 1999 р. закріплена всередині блоку 3.43 «Geophysik & Geodäsie» як підспеціальність «Geodäsie, Geoinformatik, Kartographie». Децентралізована акредитаційна система забезпечує спадковість, де будь-яке розширення коду накладає обмеження для запобігання зникнення вузьких дисциплін. У німецьких реєстрах HRK та DFG однією із цілей є забезпечення спадковості від бакалаврату до докторантури, що можна побачити у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Місце картографії в класифікаціях HRK/DFG Німеччини

(складено автором за [115; 123])

Період	Реєстр	Назва галузі знань або спеціальності	Статус картографії
1991-1998	DFG	115 «Geographie» (гуманітарні & соціальні)	картографія не виокремлена
1999-2004	DFG	31 «Науки про Землю», 315 «Geophysik & Geodäsie»	картографія виокремлена всередині 315-01
2004-2011	DFG	315 «Geophysik & Geodäsie»	картографія виокремлена всередині 315-01/315-02
2012-нині	DFG	3.43 «Geophysik & Geodäsie»	картографія виокремлена як 3.43-02 Kartographie (чинний)
2001-нині	HRK	08 «Engineering Sciences»	окрема спеціальність 280 «Kartographie»

Американська та канадська системи проводили спільну адаптацію до МСКО (2000-2015 pp.), після якої залишилось 50 серій у CIP. Серія 45 «Social Sciences» містить підсерію 45.07 «Geography & Cartography» з чітким кодом 45.0702 «GIS & Cartography», коли серія 40 «Physical Sciences» охоплює Earth

Sciences, але без картографії як окремої спеціальності. Гармонізація з МСКО-F 2013 відносить код 45.0702 одразу у дві галузі – 0532 Earth Sciences та 0731 Architecture/Planning, залишаючи університетам свободу вибору. Хронологія відображена у таблиці 2.5.

Таблиця 2.5

Місце картографії в класифікації спеціальностей США та Канади (складено автором за [127; 138])

Період	Редакція CIP	Серія / підсерія	Статус картографії
1980-1999	CIP-2000	45.07 «Geography & Cartography»	Виділено як 45.0702 GIS & Cartography
2000-2012	CIP-2010	45.07 «Geography & Cartography»	Виділено як 45.0702 GIS & Cartography
2013-нині	CIP-2020/2021	45.07 «Geography & Cartography»	Виділено як 45.0702 GIS & Cartography (відповідає 0532 та 0731 в мапінгу ISCED-F)

Міністерство вищої освіти Франції після подвійної реформи, що включала гармонізацію до МСКО та адаптацію до Болонського процесу 1999-2011 рр. об'єднало окрему спеціальність «cartographie» в ширше поняття géomatique, що викладається у блоках «Géographie & Aménagement» та «Sciences de la Terre». Хронологія відображена у таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Місце картографії в номенклатурах Франції (складено автором за [114])

Період	Номенклатура	Галузь / блок	Статус картографії
до 1999	Diplôme d'État	«Géographie», «Géodésie & Cartographie»	самостійна
1999-2014	LMD-реформа	«Géographie & Aménagement»	інтегрована
2014-нині	Liste nationale (Licence)	«Humanités», «Géographie & Aménagement», «Sciences de la Terre»	картографія інтегрована у широку спеціальність géomatique
2018-нині	Nomenclature GER (R&D)	SHS / ST панелі	самостійна у двох панелях

На рівні докторантури у Франції дисципліну закріплено відразу у двох наукових панелях HCERES – «SHS7_1 Géographie» і «ST3 – Sciences de la Terre & Univers».

У Великій Британії за останні 25 років було тричі повністю перекодовано спеціальності. Перехід від JACS 1993 р. до JACS-3 2012 р. закріпив окремий напрям підготовки F844 «Cartography», а з 2020 р. система САН окремо зафіксувала картографію як 101058 Cartographic Science. Хронологія відображена у таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Місце картографії в класифікаціях Великої Британії (складено автором за [103])

Період	Система	Галузь	Картографія
1993-2002	HESA Subject List	(6) Physical Sciences	Інтегрована до спеціальності F8 Geographical Sci.
2003-2007	JACS-1	F8 «Physical Geographical Sciences»	Виокремлена як F844 «Cartography»
2008-2019	JACS-3	F8 «Physical Geographical Sciences»	Виокремлена як F844 «Cartography»
2020-нині	HECoS/ САН	САН26 «Geography, Earth & Env.»	Виокремлена як 101058 «Cartographic Science»

Польща пройшла схожий з Україною шлях, коли у процесі узгодження з МСКО у 2018 р. уряд скоротив перелік академічних спеціальностей, об'єднавши колишні «Geodezja i Kartografia» та «Geografia» у комплексні галузі без деталізованих напрямів. До того моменту «Геодезія і картографія» належала до технічних наук, а географія – до природничих, обидві дисципліни мали власні коди в кожному циклі підготовки. Після 1 жовтня 2018 р. вони «розчинилися» у двох міжгалузевих кластерах як видно у таблиці 2.8. Рішення мотивувалися надмірною деталізацією, яка нібито ускладнювала експертизу наукових робіт і міжнародне порівняння. Проте професійна спільнота – Асоціація польських геодезистів, Товариство картографів, фотограмметристів та ін. – ще на етапі обговорення переймалась питанням розриву із практичною кваліфікацією інженерів-картографів і потенційного відтоку кадрів.

Таблиця 2.8

Місце географії та картографії серед галузей наук та спеціальностей Польщі
(складено автором за [132-135])

Період	Надгалузевий блок	Галузь	Статус картографії / географії
1986-1992	Природничі науки	Географія	Існує як окрема спеціальність
	Технічні науки	Геодезія і картографія	Самостійна
1992-2011	Науки про Землю	Географія	Збережена
	Технічні науки	Геодезія і картографія	Збережена
2011-2018	Природничі науки	Науки про Землю (Географія)	Збережена
	Технічні науки	Геодезія і картографія	Збережена
2018-2022	Інженерно-технічні науки	Будівництво, геодезія та транспорт	Геодезія та картографія інтегровані
	Точні та природничі науки	Науки про Землю та довкілля	Географія інтегрована
2022-нині	Інженерні науки	Будівництво, геодезія та транспорт	Геодезія та картографія інтегровані
	Точні та природничі науки	Науки про Землю та довкілля	Географія інтегрована

В Україні перелік 2006 р. відніс картографію до галузі «Геодезія та землеустрій», перелік 2010 р. знову оминув її серед 51 магістерської спеціальності, а постанова КМУ № 266 (2015) поглинула і географію, і картографію широкою спеціальністю «103 Науки про Землю» без деталізованих шифрів. Редакція 2025 р., наслідуює МСКО замість гармонізації, зберігає узагальнену структуру без врахування історичного контексту та ігнорує практичний, освітянський та науковий досвід. Хронологія змін представлена у таблиці 2.9.

Адміністративна консолідація спростила статистику, але знизила видимість спеціальності, ускладнила доступ до конкурсного фінансування та спричинила відтік молодих фахівців у суміжні ІТ-галузі.

Місце картографії серед галузей наук та спеціальностей України
(складено автором за [29-31])

Рік	Документ	Галузевий блок	Статус картографії
2006	Постанова КМУ № 1719	0801 «Геодезія, картографія та землеустрій»	Картографія у складі блоку, без власного шифру
2010		«Природничі науки» (51 спец.)	Картографія відсутня серед магістерських спец.
2015	Постанова КМУ № 266	103 «Науки про Землю»	Повне поглинання, шифрів немає
2025	Постанова КМУ № 266 / Редакція від 25.02.2025	103 «Науки про Землю»	Картографія не відновлена

Ми не можемо точно сказати, в який момент український національний перелік галузей і спеціальностей стали наближати до міжнародного переліку замість адаптації цього стандарту до національних особливостей, але через його постійний перегляд ми все більше втрачаємо українську науку. З іншого боку приклад передових країн Заходу показав, що збереження національного набутого досвіду завжди можливо зберегти, якщо поставити правильний пріоритет під час гармонізації до будь-яких стандартів.

Відсутність спеціальності «Картографія» у чинному переліку галузей знань і спеціальностей означає не просто адміністративне приєднання дисципліни до блоку 103 «Науки про Землю», а й фактичне згортання профільних освітніх програм. Скорочення набору студентів уже сьогодні підриває кадровий резерв: у найближче десятиліття бракуватиме викладачів, прикладних фахівців і дослідників, чия робота забезпечує точність і естетичну якість карт. Без нових ідей і методик уповільниться розвиток усіх галузей, що покладаються на просторову аналітику – від логістики й інженерії до природоохоронного планування.

Оновлений у 2025 р. перелік галузей знань остаточно розподілив картографію між різними напрямками: технічними («Будівництво та

архітектура»), природничими (Е4 «Науки про Землю») і навіть соціальними (С6 «Географія й регіональні студії»). Таке розпорошення створює замкнене коло, де відсутність окремої спеціальності обмежує можливості працевлаштування, що зменшує кількість абітурієнтів, а менший студентський контингент скорочує випуск фахівців і відтак нівелює потенціал наукових шкіл. У результаті питаннями точності, візуальної виразності й достовірності карт просто нікому буде опікуватися. Досвід показує, що цифровізація сама по собі не гарантує захисту від похибок і навіть може сприяти збільшенню їх кількості. Без кваліфікованих картографів ризики помилок, спотворень та фальсифікацій лише зростатимуть. Таким чином, чинна нормативна база формує системний бар'єр для технологічного й наукового прогресу держави, закладаючи підґрунтя для картографічної безграмотності на роки вперед [22].

2.3.2 Природні фактори

Точність та якість картографічної візуалізації автомобільних шляхів визначається сукупністю врахованих природних умов і використаних технологій при формуванні пакету просторових даних. У разі, якщо ми можемо впливати на організаційно-регуляторні фактори, то природні фактори регулювати ми не можемо і треба ретельно підходити до їх врахування. До природних факторів, що впливають на збір просторових даних можна віднести рельєф, гідрографію, клімат і рослинність [21].

2.3.2.1 Рельєф

Серед перерахованих природних факторів саме *рельєф* має найбільше значення у контексті збору та відображення просторових даних про дороги. Вимірювання та моделювання протяжності шляхів у гірській місцевості із значними перепадами висот, крутими схилами тощо суттєво ускладнені. Через великі ухили відстані, виміряні по горизонтальній проекції на карті, можуть суттєво відрізнятися від фактичної довжини дороги на місцевості. Також гірські шляхи вимушено огинають хребти та ущелини, що ускладнює їх точне планове відображення через високу звивистість. Щільно протікають численні річки і

струмки, утворюючи вузькі долини, через які дороги прокладаються мостами чи серпантинами. У таких природних умовах відобразити геометрію дороги важко навіть на великомасштабних картах, що призводить до похибок при картометричних вимірюваннях, а чим звивистіша лінія маршруту, то важче досягти високої точності її вимірювання на карті (рис. 2.10).



Рисунок 2.10 – Зображення маршруту через гірську місцевість у Міжгірському районі Закарпатської області за допомогою карт ГМ (синій колір) та реальна геометрія дороги (червоний колір)

Крім безпосереднього впливу на конфігурацію маршруту, рельєф суттєво впливає на точність дистанційного зондування. Нахили поверхні змінюють кут відбиття лазерного імпульсу або світлового променя, що викликає локальні викривлення у цифровій моделі поверхні. Похибка картографічного вимірювання довжини лінії на ділянці з великим ухилом може значно

перевищувати 1% лише за рахунок ігнорування вертикальної складової [20]. Зокрема, у разі ухилів понад 10° горизонтальне прокладення суттєво втрачає свою точність як наближене значення довжини траси.

Загалом, ухили в гірських районах змушують адаптувати методику збору даних, оскільки класичне проєктування лінії в плані не відповідає її реальному просторовому положенню. Ми рекомендуємо використовувати тривимірні методи аналізу, де відображення лінійного об'єкта базується на його реальній тривимірній конфігурації, а не на площинній проєкції (рис. 2.11).



Рисунок 2.11 – Тривимірна візуалізація фрагменту ділянки траси I-80 за допомогою хмари точок у середовищі QGIS та інструменту StreetView від GM

Лише така модель дозволяє отримати наближене до реальності значення довжини та геометрії траси. Також важливим є створення еталонних моделей рельєфу для калібрування даних про довжину дороги, що дозволяє зіставити різні джерела інформації та оцінити похибку при переході від одного типу знімання до іншого. Це може бути особливо критично при укладанні офіційної картографічної продукції для гірських регіонів, де неврахування рельєфу здатне суттєво спотворити просторову картину і призвести до хибних рішень при плануванні.

2.3.2.2. Гідрографія

Гідрографічні особливості території істотно впливають на конфігурацію і протяжність автомобільних шляхів, особливо в умовах гірського і низинного рельєфу. Гірський рельєф із численними струмками, водоспадами та вузькими річковими долинами створює природні перешкоди, що зумовлює необхідність будівництва мостів, серпантинів або тунелів на дорогах. Це зумовлює додаткову звивистість маршрутів та ускладнює їх точне планове відображення (рис 2.10). Крім того, водотоки в горах мають значну ерозійну здатність і постійно модифікують конфігурацію рельєфу, що змінює умови трасування та створює складність у підтримці актуальності картографічної інформації (рис 2.12).

На рівнинних ділянках гідрографія зумовлює інші виклики. Дороги часто проходять у заплавах річок, вздовж озер або через заболочені території. На таких ділянках будь-яке зміщення русла чи сезонне підтоплення може спричинити знищення дорожнього полотна або необхідність у зміні маршруту. Неврахування гідрологічної динаміки призводить до помилок у картографічній візуалізації, зокрема утворення на картах хибних місць перетину дороги з річкою, що в реальності вже не існують через зміни в руслі або будівництво нових об'їздів. Окрему увагу доцільно приділити можливості відображення затоплюваних територій, гідрологічних моделей і реальних спостережень при використанні карт автомобільних шляхів. Відсутність постійного моніторингу підтоплюваності в заплавах річок призводить до того, що ділянки доріг можуть формально залишатися на карті, хоча фактично втрачені через паводкові процеси (рис. 2.13, 2.14).



Рисунок 2.12 – (1) Еродована дорога між селами через паводки на річці та (2) розмокання дороги під час опадів у Міжгірському районі Закарпатської області (2024 рік) (джерело: фото автора)



Рисунок 2.13 – Еродована дорога через розлив річки Східничанка, Львівська область. Фото зняті із інтервалом 30 хвилин (2023 рік) (джерело: фото автора).

Крім фізичного впливу водного середовища на лінію дороги, гідрографія є джерелом технічної похибки при вимірюванні протяжності. Дороги, що слідує за меандрами річок, мають складну конфігурацію, яку важко точно передати без високої щільності точок або помірної генералізації (рис. 2.10). За умови недостатньої деталізації просторових даних, кривизна маршруту спрощується, втрачаються плавні вигини, що призводить до заниження обчисленої довжини траси.



Рисунок 2.14 – Руйнування мосту через річку Східничанку під час паводку, с. Східниця, Львівська область (2023 рік) (джерело: фото автора)

На рівні нормативних вимог актуалізація гідрографічної ситуації є обов'язковою: відповідно до Закону України «Про оцінку впливу на довкілля» та пов'язаних із ним стандартів, під час проектування та оновлення транспортної інфраструктури слід обов'язково враховувати водоохоронні зони, межі заплав і потенційно підтоплювані території [14]. Це передбачає але, на жаль, не регламентує регулярне, оперативне коригування картографічної моделі дороги, особливо в районах із високим рівнем гідрологічної мінливості.

2.3.2.3. Клімат і погода

Клімат і погодні умови у більшості випадків не впливають безпосередньо на геометрію дорожнього полотна, за винятком окремих екстремальних проявів. Водночас у типових умовах вони мають істотний вплив на безпеку дорожнього руху – зокрема на коефіцієнт зчеплення, видимість та загальний рівень ризику при пересуванні. На онлайн-платформах GM та OSM реалізовано базові механізми індикації доступності маршрутів під час екстремальних погодних подій – таких як урагани, повені, лісові пожежі. У цих випадках волонтерські оновлення відіграють ключову роль у забезпеченні оперативності відображення динаміки явищ, а погодні дані використовуються для візуалізації зон стихійного впливу та траєкторії розповсюдження явища (рис. 2.15, 2.16).



Рисунок 2.15 – Траєкторія урагану Хелена (2024 рік) на GM (джерело: [90])

Проте, нинішні цифрові карти здебільшого не передбачають завчасного попередження водіїв про ризиковані погодні тенденції, які ще не досягли критичної межі, але можуть її перетнути найближчим часом.

Зокрема, залишається нереалізованим потенціал картографічної інтеграції інформації про передумови виникнення ожеледиці, надмірних опадів, які

можуть спричинити паводки, або температурно-вологісних умов, що сприяють утворенню туманів. Врахування таких чинників є особливо важливим у перехідні сезони, коли погодні ризики змінюються динамічно, а своєчасна інформованість водіїв може значною мірою знизити кількість аварійних ситуацій.

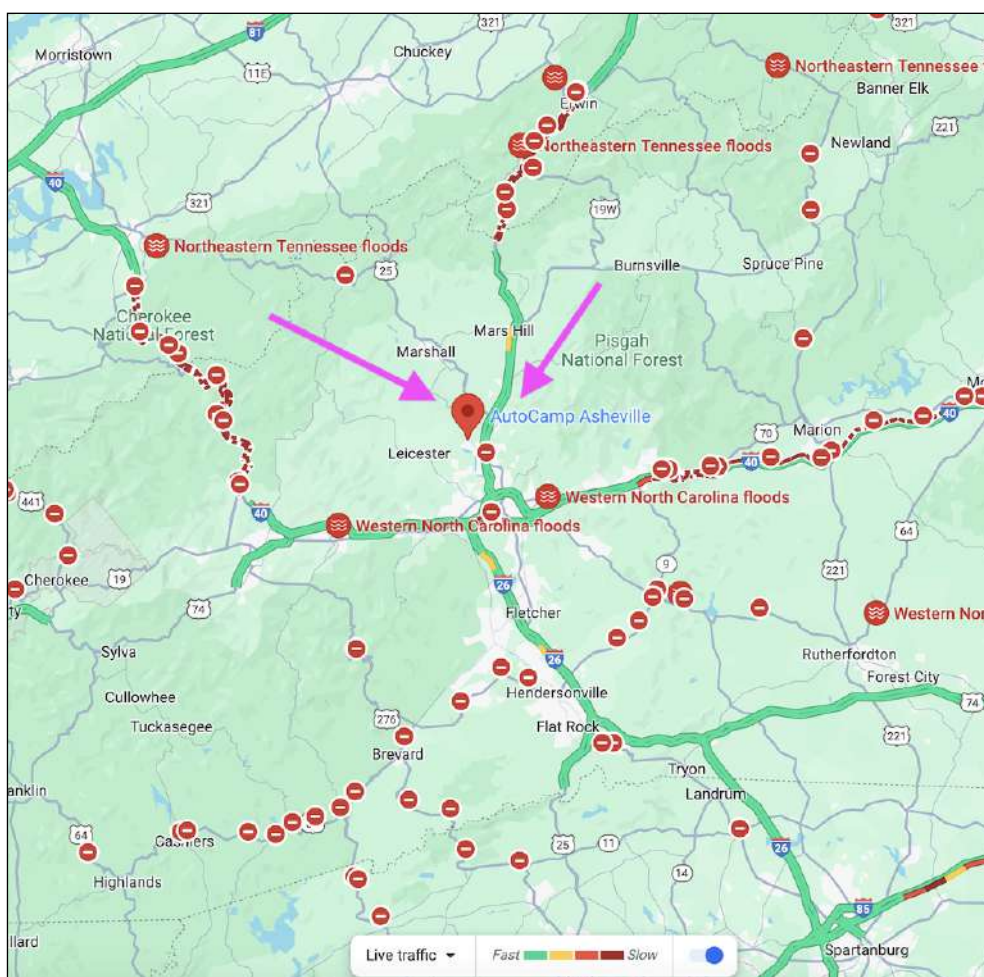


Рисунок 2.16 – Індикація обмежень проїзду по дорогах у передгірській зоні Аппалачів поблизу міста Leicester, Північної Кароліни під час урагану Хелена (2024 рік) (джерело: [124])

Найбільшого значення це набуває для водіїв, чиї маршрути проходять гірськими районами, де погодні умови змінюються швидко і непередбачувано. У таких регіонах різкі перепади температур, інтенсивні опади та часті тумани здатні раптово змінити дорожню обстановку, роблячи навіть знайомі ділянки небезпечними для пересування. Якщо на карті не враховані такі зони підвищеного ризику (наприклад, відрізки доріг, де найчастіше утворюється

туман, накопичуються сніг або вода без можливості стоку під час інтенсивних опадів), водії потрапляють у небезпеку, не маючи завчасного попередження. Також недостатня деталізація карт у місцях з частими кліматичними загрозами (наприклад, лавинні зони або райони з сезонним розмиттям дорожнього полотна) може призвести до аварійних ситуацій.

Особливої актуальності це набуває в умовах зміни клімату, коли раніше стабільні зони стають схильними до нових кліматичних проявів. Це вимагає регулярного оновлення карт із урахуванням погодної статистики та зон небезпеки, а кліматичні ризики повинні розглядатися не лише як фоновий чинник, а як повноцінний компонент цифрових дорожніх карт.

2.3.2.4. Рослинність

Рослинність, як фактор безпеки та навігації на автомобільних шляхах, формує локальні особливості дорожнього середовища та істотно впливає на безпеку руху в населених пунктах, а особливо в гірських і лісистих регіонах (рис. 2.17).

Густий лісовий покрив знижує якість огляду дороги: ускладнює візуальне орієнтування, обмежує видимість поворотів, перехресть, пішоходів чи тварин, які можуть несподівано з'явитися на проїжджій частині. Окрім того, густе листяне покриття здатне екранувати або викривлювати сигнали супутникових навігаційних систем (GPS/GNSS), що створює додаткові труднощі при маршрутизації – як для цивільного транспорту, так і для військових колон.

У гірській місцевості влаштування широких узбіч обмежене рельєфом і технічними умовами, що посилює ризики на звужених і затінених ділянках. У таких ситуаціях доцільним є впровадження в навігаційні платформи інформаційних шарів про обмежену видимість, зокрема показників візуального охоплення (наприклад, дистанції до наступного повороту з обмеженим оглядом) та рекомендованих швидкісних режимів.



Рисунок 2.17 – Рослинність на узбіччях, що зменшує поле видимості для адекватної оцінки дорожньої обстановки. (Джерело: фото автора)

Зміни в рослинному покриві – вирубки, повторне заростання, пожежі або стихійні лиха – часто відбуваються швидше, ніж оновлюється більшість цифрових карт. Це призводить до ситуацій, коли водії орієнтуються на застарілі дані, що підвищує ризики ДТП, особливо на малознайомих маршрутах. Тому актуалізація цифрових шарів рослинності є критично важливою. Такі шари доцільно реалізовувати у вигляді додаткових модулів для онлайн-карт (наприклад, GM, OSM) або інтегрувати в ГІС-середовище, де вони можуть враховувати структуру крони дерев, кут нахилу схилів, рівень затінення – усе це

є базою для прогнозування складних дорожніх ділянок та підвищення точності навігаційних сервісів. Для військових підрозділів це має особливу цінність під час планування евакуації, розгортання техніки або прихованих маневрів у зонах бойових дій. Дорожня обстановка може бути зафіксована також за допомогою лазерного знімання із кольоровим розпізнаванням (рис. 2.18).



Рисунок 2.18 – Дорожня обстановка на ділянці автомобільного шляху М-03 Харків-Валки, візуалізація у програмному середовищі QGIS (джерело: польові дані автора)

В умовах рівнинного рельєфу, особливо в степовій та лісостеповій зонах, рослинність на узбіччях також істотно впливає на безпеку та тактичні можливості (рис. 2.17, 2.18). Для цивільного транспорту лісосмуги можуть знижувати видимість на перехрестях і поворотах, ускладнюючи оцінку дорожньої ситуації. Водночас для військових операцій узбічна рослинність є подвійним чинником: з одного боку, вона забезпечує природне маскування, прихисток для техніки та особового складу, можливість організувати спостережні пункти або засідки; з іншого – створює потенційні загрози у разі

використання противником, наприклад, для мінування чи перехоплення маршруту.

У відкритому степовому просторі навіть окремі ділянки лісистості – чагарники, посадки, лісосмуги – стають критично важливими у воєнному плануванні, оскільки на таких ділянках виникає вразливість маршруту. Особливо це стосується мостів, розв'язок, поворотів, де спостереження ускладнене й підвищується ризик втрати контролю над ситуацією.

Таким чином, рослинність не змінює геометрії дороги безпосередньо, але визначально впливає на видимість, якість навігації та рівень безпеки дорожнього руху. Її роль у військовому контексті – ще вагоміша, оскільки правильне або неправильне врахування узбічних насаджень може як посилити тактичну перевагу, так і створити критичні загрози. Відповідно, деталізоване картографування таких об'єктів має стати стандартною практикою при створенні як цивільних, так і спеціалізованих цифрових карт.

2.3.3. Технологічні фактори

Точність карт автомобільних доріг залежить не лише від природи, але й від рівня розвитку технологій картографування. Історично довжини шляхів визначалися геодезичними та картометричними методами, які поступово вдосконалювались. Класичні наземні геодезичні методи – тріангуляція, полігонометрія, нівелювання – ще в середині ХХ ст. заклали фундамент точного вимірювання відстаней. Вимірювання теодолітом і сталеву стрічкою забезпечували сантиметрову точність на коротких базисах, проте розгортання суцільної мережі вимірювань на великій протяжності доріг було вкрай трудомістким. Для побудови профілів трас застосовували нівелювання, яке вимагало значних зусиль; оптимізація таких методів була актуальною ще наприкінці 1990-х. Використання тріангуляційно-тригонометричного нівелювання при створенні висотних основ зйомок розширювало інструментарій точних вимірювань у дорожніх вишукуваннях. Технологічні можливості того часу могли дати високу точність локально, але для масштабного картографування дорожніх мереж їх ефективність була

обмеженою – як через трудомісткість, так і через вплив накопичуваних похибок на великих відстанях.

Відчутний прорив у технологіях збору геоданих стався із впровадженням дистанційних методів. У середині XX століття активний розвиток отримало аерофотознімання, яке дозволило прискорити довготривалі польові вимірювання через охоплення великих територій з повітря та отримання зображення місцевості для подальшої обробки та використання. У 1960–70-х роках фотограмметричні методи широко використовувалися для укладання топографічних карт, у тому числі дорожньої мережі. При цьому важливе значення мала якість отриманих знімків і точність прив'язки контрольних точок. Поступово відбувався перехід від аналогових методів до цифрових. Аерофотознімання забезпечувало планову точність, прийнятну для карт масштабу 1:50 000–1:10 000, але в зонах із щільною рослинністю чи гірським рельєфом залишалися «прогалини» – ці ділянки вимагали додаткових наземних вимірювань або ж лишалися узагальненими.

Запуск перших штучних супутників Землі відкрив нову еру в картографуванні. Уже в 70-х роках XX ст. з'явилися глобальні супутникові зображення серії Landsat, які дали можливість оновлювати дрібномасштабні карти. Проте роздільна здатність ранніх супутникових даних складала десятки метрів і була недостатньою для детального відображення автодоріг. Лише з появою комерційних високороздільних супутників (IKONOS, QuickBird) у 2000-х роках зробило можливим розрізняти на знімках окремі дороги, їх смуги та розв'язки. Це дало поштовх до створення ортофотокарт і оновлення генеральних планів шляхів з позиційною точністю до кількох метрів. Водночас слід зауважити, що навіть сучасні супутникові знімки потребують геодезичної прив'язки. Похибки визначення координат на зображеннях можуть сягати кількох метрів через неточність орбіти чи моделі рельєфу при ортотрансформуванні. Із своєю появою космічне зондування значно розширило охоплення території для потреб картографування, але його позиційна точність і точність для визначення довжин доріг все ще залишається нижчою, ніж у наземних геодезичних вимірювань.

Паралельно зі становленням супутникових методів розвивалися й цифрові картографічні технології. У 1990-х роках почали створюватися геоінформаційні системи (ГІС), що вимагало оцифровування паперових карт. На жаль, при переведенні старих карт у цифровий формат виникали додаткові похибки – неточності оцифрування, різна система координат тощо.

На початку XXI ст. з'явився ще один виклик і водночас можливість – краудсорсингові відкриті карти. Проекти типу OSM, що стартували у 2004 р., залучили широке коло волонтерів до збору геоданих, в тому числі про дороги, використовуючи споживчі GPS-пристрої та оцифрування супутникових знімків, що дало змогу в короткі терміни покрити великі території, в тому числі там, де офіційні топографічні роботи відставали. Проте якість таких даних залежить від активності й кваліфікації спільноти. Такого типу карти придатні для загального використання і оперативного оновлення даних, але їх точність не завжди гарантована на рівні, необхідному для інфраструктурного планування.

На практиці широко застосовуються онлайн-картографічні сервіси як GM, OSM тощо, які надають інформацію про маршрути в реальному часі. Ці сервіси агрегують дані з різних джерел – супутникових знімків, офіційних джерел, користувацьких треків. Вони зручні у користуванні, але питання їх метричної точності лишається відкритим.

Особливе місце посідає лазерне сканування. Ця технологія поєднала в собі швидкість дистанційного зондування та точність геодезичних вимірювань. Перші наземні лазерні сканери з'явилися наприкінці XX ст., і за останні ~10–15 років лазерне сканування набуло значного розвитку. По суті, лазерний сканер автоматично виконує ті ж куто- та дальномірні вимірювання, що і класичний тахеометр, але в безперервному режимі й по всій поверхні об'єкта. Результатом є хмара точок – набір тривимірних координат відбиваючої поверхні з дуже високою щільністю. Це означає, що на відміну від традиційного знімання, де фіксуються окремі точки траси (підмети), лазерне сканування дає суцільну модель дороги і прилеглого рельєфу. Такий підхід усуває суб'єктивні похибки вибору точок і проміжне оцифровування, бо дані одразу доступні в цифровому

форматі і готові для аналізу. Внаслідок цього підвищується і точність, і детальність картографічних матеріалів.

У сучасній геодезичній практиці лазерне сканування поділяють на наземне стаціонарне та мобільне. Мобільні лазерні скануючі системи встановлюються на рухомих носіях (автомобіль, залізнична платформа або безпілотник) і дозволяють збирати дані вздовж лінійних об'єктів – насамперед доріг – у динамічному режимі. Ключова перевага лазерного сканування – його виняткова точність і повнота даних. Сучасні мобільні лазерні системи забезпечують точність визначення положення точок, за сприятливих умов, порядку декількох сантиметрів. Вертикальна точність лазерного сканування настільки висока, що різниця висот на місцевості виявляється з точністю до сантиметра і поперечний профіль дороги відображається дуже детально. Важливо підкреслити, що лазерне сканування ефективно працює саме в тих умовах, де інші методи не дають бажаної точності. Наприклад, у густому лісі або гірських ущелинах, де GPS втрачає сигнал, а традиційна зйомка потребує великих затрат, лазерне знімання здатне зібрати дані швидко і детально. Завдяки описаним перевагам, лазерне сканування нині вважається найбільш ефективним методом для отримання геопросторових даних про автомобільні дороги. Порівняльні дослідження підтверджують його виняткову точність, а результати вимірювання довжин автодоріг за допомогою лазерного сканера практично збігаються з результатами класичного геодезичного знімання [20]. Лазерні та традиційні виміри дали майже ідентичні значення протяжності маршрутів, що свідчить про високий рівень достовірності обох методів. Огляд українських нормативних документів і технологій, виконаний Ю. Карпінським і Н. Лазоренко-Гевель, показав, що чинна нормативна база топографо-геодезичних робіт застаріла і не відповідає рівню сучасних геоінформаційних технологій. Застарілі підходи до оновлення карт вже не забезпечують потрібної точності і оперативності. Сьогодні існує нагальна потреба переглянути стандарти та інструкції картографування, впровадивши вимоги щодо використання GNSS-методів, лазерного сканування та інших передових технологій. Картографічні основи України потребують

оновлення на основі сучасних топографо-геодезичних знімів, включно з використанням лазерного сканування. Лише за цієї умови можна гарантувати, що довжини та положення автомобільних шляхів на картах відповідатимуть реальності з мінімальними похибками [16].

Також важливо враховувати картографічну основу та методи її створення. У роботі С. В. Тітової і Т. В. Дудун вказано, що точність картографічного дослідження значною мірою залежить від параметрів вихідної карти – її математичної основи та масштабу, а також від сучасності й повноти картографічного матеріалу. Картографічна проекція завжди вносить певні спотворення на площині, особливо на великі відстані, тому вибір проекції, оптимальної для певного регіону, є критичним для мінімізації похибок взаємного розташування об'єктів. Масштаб карти визначає вибір ступеню генералізації, яка теж впливає на точність відображення доріг. Тож правильний вибір геодезичної та картографічної основ є важливою технологічною передумовою високоякісного картографування шляхів [36].

Висновки до другого розділу

Узагальнений аналіз графічних особливостей відображення автомобільних шляхів показує, що основні ненавмисні фальсифікації виникають через:

1) невідповідність лінійного умовного знака реальній просторовій геометрії дороги. Проекція траси згладжує серпантини, зменшує довжину на ухилах і, разом із фіксованою товщиною символу, формує спрощений образ, який лише частково відтворює просторову структуру об'єкта;

2) кумулятивні втрати точності, що накопичуються на всіх етапах обробки даних: перехід між різними картографічними проекціями, неоднорідні системи координат, багатократні конвертації форматів, ручне редагування та алгоритмічна генералізація. Оверлейний аналіз показує, що ці операції спричиняють розбіжності між офіційною та виміряною на карті довжиною у межах 3–20%, що суттєво позначається на навігаційних і логістичних розрахунках.

На точність картографічного й геоінформаційного моделювання лінійно-дорожніх ландшафтів найбільший вплив має поєднання трьох груп факторів:

1. Організаційно-регуляторних факторів, насамперед дотримання міжнародних стандартів метаданих (ISO 19115 і ДСТУ), та сприяння підготовці фахівців-картографів насамперед, з боку держави і профільного міністерства.

2. Природні фактори, серед яких рельєф, що визначає конфігурацію трас і масштаби ухилів; гідрографічна мережа, що диктує потребу в об'їздах, мостах і насипах; клімат і погода, які змінюють умови руху та видимість; рослинність, що обмежує огляд і блокує GNSS-сигнал, водночас створюючи тактичні переваги або загрози у військових операціях.

3. Технологічні фактори забезпечення точності картографічної візуалізації АШ сьогодні визначається можливістю інтегрувати високоточний збір просторових даних (лазерне сканування, GNSS, дистанційне зондування) з алгоритмами мультимасштабної генералізації та регулярним оновленням тематичних шарів з високою оперативністю. Лише синхронне врахування перерахованих факторів у рамках єдиного ГІС-процесу дає змогу мінімізувати похибку відображення автомобільних шляхів і забезпечити їх достовірну просторово-часову візуалізацію.

РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ПІДВИЩЕННЯ МЕТРИЧНОЇ ТОЧНОСТІ КАРТ АВТОМОБІЛЬНИХ ШЛЯХІВ

У попередніх розділах з'ясовано, що жодне з доступних картографічних джерел – ані класичні атласи, ані сучасні веб-карти – не гарантує достовірність інформації про довжину маршрутів на автомобільних шляхах, особливо в умовах складного рельєфу.

Додатковим поштовхом до цього дослідження стали численні звернення автоперевізників, які у щоденній роботі фіксували, що фактичні витрати пального й часу систематично перевищують показники, спрогнозовані маршрутними калькуляторами. Водії скаржилися не на позиційну точність поворотів чи на помилки навігації, а саме на невідповідність довжин окремих ділянок, порівняно з даними електронних карт та офіційними значеннями довжин. Це практичне спостереження дало підставу сформулювати наступну гіпотезу: відстані, що сьогодні розраховуються картографічними онлайн-платформами і вказані у нормативних переліках, можуть бути систематично заниженими, адже базуються на горизонтальному прокладенні, є генералізованими і не враховують фактичний профіль місцевості.

Для переходу від теоретичного обґрунтування до практичної перевірки гіпотези у даному розділі реалізовано послідовну методику експериментального дослідження, спрямовану на виявлення розбіжностей у визначенні довжин автошляхів, що, у свою чергу, дозволяє оцінити точність різних джерел геопросторових даних. Алгоритм складається з 4-х етапів.

1. На першому етапі встановлено розбіжності у визначенні координат контрольних точок за даними геодезичного знімання із використанням RTK-GNSS та за даними наземного та аеролазерного сканування на тестових ділянках.

2. На другому етапі проаналізовано відмінності у розрахованих довжинах ділянок доріг на основі даних із трьох джерел: геодезичних вимірювань, результатів лазерного сканування та електронних карт онлайн-платформ GM, OSM та GH.

3. Виявлення розбіжності у виміряних довжинах маршрутів на рівнинній і в гірській місцевості за даними лазерного сканування та електронних карт онлайн-платформ GM, OSM та GH.

4. Порівняння розрахованих довжин автошляхів, отриманих на основі даних електронних карт, із офіційними переліками протяжності доріг, затверджених Кабінетом Міністрів України [28] та Федеральним управлінням автомобільних доріг США (FHWA) [126]. Автошляхи, обрані для порівняння, прокладено в різних природних умовах, зокрема орфографічних. Це дозволяє одночасно оцінити, наскільки величина похибки залежить від рельєфу, визначити рейтинг точності популярних картографічних платформ, перевірити гіпотезу про ефективність лазерного сканування як еталонної технології при картографічній візуалізації дорожніх моделей з врахуванням природних факторів.

Обрані картографічні онлайн-платформи використовують за замовчуванням систему координат WGS 84, при цьому GM [120] бере відкриту або купує приватну інформацію із великої кількості джерел, а OSM [129] являє собою відкриту базу просторових даних, зібраних спільнотою волонтерів, особливість якої у швидкості оновлення, а GH [121] – це програмний продукт на основі OSM, який при прокладенні маршруту дозволяє користувачу підключати профілі висот за їх наявності, або формує профіль за обраним маршрутом із наборів цифрової моделі рельєфу SRTM [136], за якою абсолютна помилка визначення висоти складає $\pm 10\text{--}16$ м.

3.1 Визначення розбіжностей у точності відображення довжин автошляхів при застосуванні різних технологій

У першій частині експерименту здійснено серію розрахунків, метою яких було перевірити точність визначення координат, отриманих в результаті лазерного сканування, шляхом їх зіставлення з результатами геодезичного знімання, яке виступало еталонним джерелом. Було обрано тестову ділянку автодороги М-03, що розташована в Харківській області. Етап включав наступну послідовність дій:

1. Зіставлення координат точок, отриманих за допомогою геодезичного знімання та лазерного сканування.
2. Розрахунок середнього значення квадратів різниць координат.
3. Визначення середньоквадратичної похибки (СКП) окремо для координат X і Y .
4. Обчислення інтегрального значення СКП для координат X та Y разом.

Під час реалізації першого етапу аналізу було використано дані геодезичного знімання двокілометрової ділянки траси М-03 у Валківському районі Харківської області. Ці дані включали 3700 точок, координати яких були представлені в системі УСК-2000. Паралельно на цій ділянці було проведено лазерне сканування, в результаті якого сформовано хмару точок із щільністю 300 точок/м², де кожна точка має просторові координати, значення висоти та кольорові характеристики в RGB-форматі. Обробка інформації здійснювалась у програмному забезпеченні QGIS.

Із хмари точок, отриманої в результаті лазерного сканування, було відібрано 12 точок, просторове розташування яких найбільш точно відповідало положенню точок, зафіксованих під час геодезичного знімання (рис. 3.1). Саме ці точки було використано для подальших аналітичних розрахунків із застосуванням формули середньоквадратичної похибки (СКП):

$$СКП = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i^{\text{вим}} - X_i^{\text{іст}})^2}{n}} \quad (3.1),$$

де: $\sum_{i=1}^n (X_i^{\text{вим}} - X_i^{\text{іст}})^2$ - сума квадратів різниць між виміряним та

істинним значенням для кожної точки;

n - кількість вимірювань.

Вихідні дані та результати обчислень наведено в таблицях 3.1 та 3.2. Координати точок лазерного сканування ($X_{\text{л}}$, $Y_{\text{л}}$), та відповідні координати геодезичного знімання ($X_{\text{г}}$, $Y_{\text{г}}$) подано у системі координат УСК-2000. Горизонтальні прокладення між кожною парою з 12 контрольних точок були обчислені за їхніми прямокутними координатами. Колонки ΔX та ΔY

демонструють величину розбіжності в положенні точок між двома джерелами даних, виражену в метрах. У колонках $(X_{\text{л}} - X_{\text{г}})^2$ та $(Y_{\text{л}} - Y_{\text{г}})^2$ представлено квадрати цих відхилень, виражені в квадратних метрах.

Під таблицями наведено середні значення квадратів різниць та обчислені СКП для координат X і Y окремо. Загальне значення середньоквадратичної похибки для координат X та Y разом становить 0,0037 метра (3,7 мм), що свідчить про практично повне узгодження між результатами лазерного та геодезичного знімання. Крім того, сумарна довжина горизонтального прокладення між початковою і кінцевою контрольними точками, розрахована за геодезичними даними, склала 1674,5479 метра. Аналогічне значення, отримане за даними лазерного сканування, становить 1674,5536 метра. Таким чином, абсолютна різниця між ними дорівнює лише 5,7 мм, що становить 0,00034% від загальної довжини ділянки, тобто вказує на майже повну тотожність результатів двох методів.

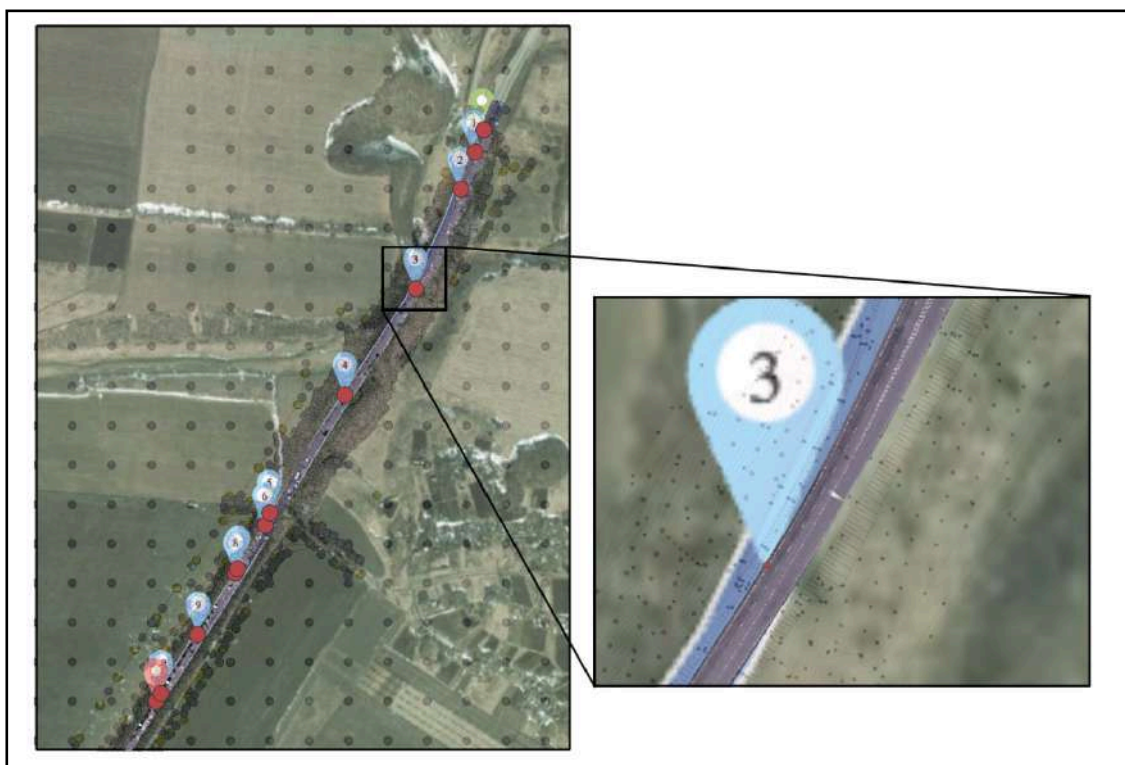


Рисунок 3.1 – Положення контрольних точок і відображення хмари точок на відрізку траси М-03 на фоні геодезичного плану місцевості.

Таблиця 3.1

Результати розрахунку квадрата різниці X-координат контрольних точок на відрітку траси М-03

№	$X_{\text{л}}$	$X_{\text{г}}$	$\Delta X, \text{ м}$	$(X_{\text{л}} - X_{\text{г}})^2, \text{ м}^2$
Початкова точка	5317711,546778320	5317711,54700	-0,000221680	0,00000004914198625
1	5317723,992778320	5317723,99000	0,002778320	0,000007719060033
2	5317817,273778320	5317817,27100	0,002778321	0,000007719065208
3	5317913,389778320	5317913,39000	-0,000221680	0,00000004914198625
4	5317919,154778320	5317919,14800	0,006778320	0,00004594562606
5	5317989,347778320	5317989,35000	-0,002221679	0,000004935858979
6	5318001,325778320	5318001,32580	-0,000021679	0,0000000004699932145
7	5318191,207778320	5318191,20500	0,002778320	0,000007719060033
8	5318369,940778320	5318369,93800	0,002778320	0,000007719060033
9	5318485,747778320	5318485,75000	-0,002221680	0,000004935863117
10	5318521,284778320	5318521,28300	0,001778320	0,000003162423478
Кінцева точка	5318542,432778320	5318542,42900	0,003778321	0,00001427570759
Середнє значення квадратів різниць				0,000008685873208
СКП для координат X				0,002947180552

Таблиця 3.2

Результати розрахунку квадрата різниці Y-координат контрольних точок на відрітку траси М-03

№	$Y_{\text{л}}$	$Y_{\text{г}}$	$\Delta Y, \text{ м}$	$(Y_{\text{л}} - Y_{\text{г}})^2, \text{ м}^2$
1	2	3	4	5
Початкова точка	5520200,85787	5520200,86400	-0,00613	0,00003754674672
1	5520221,01287	5520221,01100	0,00187	0,000003506107792
2	5520368,98387	5520368,98300	0,00087	0,00000076118679

Продовження таблиці 3.2

1	2	3	4	5
3	5520526,09787	5520526,09000	0,00787	0,00006197563291
4	5520535,62187	5520535,62200	-0,00013	0,00000001626668151
5	5520646,11687	5520646,12000	-0,00313	0,00000978150934
6	5520677,52787	5520677,53010	-0,00223	0,000004961935022
7	5520977,60487	5520977,60200	0,00287	0,000008251024099
8	5521246,37787	5521246,38100	-0,00313	0,00000978150934
9	5521498,55587	5521498,56000	-0,00413	0,00001703658393
10	5521592,32687	5521592,33500	-0,00813	0,00006605691214
Кінцева точка	5521648,95487	5521648,95600	-0,00113	0,000001271346754
Середнє значення квадратів різниць				0,00001841223013
СКП для координат Y				0,004290947463

Отримані результати підтверджують високу точність лазерного сканування як методу вимірювання та моделювання реальної поверхні, що дозволяє використовувати його як цифрову основу для картографування загалом, і зокрема – для детального відображення автомобільних шляхів. Високий рівень точності дозволяє проводити розрахунки технічних параметрів об'єктів інфраструктури, забезпечити перехресну перевірку інших джерел даних, а також для урахування природних чинників – таких як рельєф, гідрографія, рослинність і кліматичні умови – які істотно впливають на точність візуалізації автомобільних шляхів та безпеку дорожньої мережі.

4.

У межах цього етапу дані лазерного сканування траси М-03, надані Навігаційно-геодезичним центром, було використано як базу для порівняння. Оскільки координати надано у системі УСК-2000, їх трансформовано у систему WGS 84 за допомогою середовища QGIS. Положення контрольних точок зображено на рисунку 3.2.

Горизонтальне прокладення за даними УСК-2000 склало 1949,67 м, а з урахуванням висоти точок – 1950,65 м. Після трансформації в систему WGS 84 довжина цієї ж ділянки, розрахована в QGIS за допомогою інструменту Measure Line, становила 1944,05 м, а з урахуванням висоти точок – 1945,03 м. Орієнтовна похибка при переході від прямокутної до геоцентричної системи координат склала близько 5 метрів або 0,26% від загальної довжини.

У таблицях 3.3-3.6 наведено результати розрахунків, зокрема:

- L_{Γ} (QGIS) – горизонтальне прокладення, розраховане інструментом Measure Line в QGIS;
- L_{Γ} (OSM) – горизонтальне прокладення, розраховане в базовій версії OSM;
- L_{Γ} (GH) – горизонтальне прокладення, розраховане за допомогою моделі GH на базі OSM;
- ΔL_{Γ} (QGIS-OSM) – різниця між даними, розрахованими в середовищі QGIS та даними базової версії OSM;
- ΔL_{Γ} (QGIS-GH) – різниця між даними QGIS та моделі GH на базі OSM;
- $(\Delta L_{\Gamma})^2$ (QGIS-OSM)² та $(\Delta L_{\Gamma})^2$ (QGIS-GH)² – квадрати різниць для подальших обчислень середньоквадратичної похибки.

Усі обчислення здійснено в метрах, із використанням координатної системи WGS 84.



Рисунок 3.2 –Положення контрольних точок сегментів та загальної площинної геометрії ділянки траси М-03 на фоні лазерного знімання та шару OSM Standard в QGIS.

Таблиця 3.3

Визначення різниці горизонтальних прокладень між контрольними точками та СКП на основі OSM (базова версія) і моделі GH для ділянки траси М-03 Харків-Валки

№	Координати	L_{Γ} (QGIS), м	L_{Γ} (OSM), м	L_{Γ} (GH), м	ΔL_{Γ} (QGIS- OSM), м	ΔL_{Γ} (QGIS- GH), м	$(\Delta L_{\Gamma})^2$ (QGIS- OSM) ² , м ²	$(\Delta L_{\Gamma})^2$ (QGIS- GH) ² , м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	49.9094772, 35.7568418							
		150,13	150	150,09	0,13	0,04	0,02	0,00
2	49.908204, 35.756148							

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
		149,56	149	149,06	0,56	0,50	0,31	0,25
3	49.90696, 35.755372							
		148,9	149	149,17	-0,10	-0,27	0,01	0,07
4	49.905751, 35.75447							
		146,59	147	146,74	-0,41	-0,15	0,17	0,02
5	49.904604, 35.753465							
		150,09	149	150,01	1,09	0,08	1,19	0,01
6	49.90348, 35.752309							
		150,7	151	150,46	-0,30	0,24	0,09	0,06
7	49.902349, 35.751154							
		150,98	150	150,86	0,98	0,12	0,96	0,01
8	49.90119, 35.75006							
		149,27	149	148,88	0,27	0,39	0,07	0,15
9	49.900033, 35.749014							
		149,98	150	150,12	-0,02	-0,14	0,0004	0,02
10	49.898882, 35.74792							
		147,98	147	147,79	0,98	0,19	0,96	0,04
11	49.897763, 35.746806							
		149,67	149	149,53	0,67	0,14	0,45	0,02
12	49.896639, 35.745661							
		150,59	150	150,39	0,59	0,20	0,350	0,04

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13	49.895507, 35.744512							
		149,63	149	149,48	0,63	0,15	0,40	0,02
14	49.894376, 35.743383							
Середнє значення квадратів різниць							0,38	0,05
СКП							0,62	0,23
Частка від загального							0,032%	0,012%

Аналіз відмінностей між значеннями, отриманими в середовищі QGIS, та результатами розрахунків на основі онлайн-карт показав наступне. Для даних OSM розбіжності варіюються в межах від -0,41 до +1,09 метра, для GH – від -0,27 до +0,50 метра, а для GM – від -3,41 до +0,98 метра.

Середні значення квадратів різниць між довжинами ділянок доріг становлять за даними OSM 0,38 м², за даними GH 0,05 м², за даними GM 1,52 м². Відносно загальної довжини горизонтального прокладення ці значення становлять відповідно 0,032%, 0,012% та 0,06%. Розраховані середньоквадратичні похибки (СКП) становлять 0,62 м для OSM, 0,23 м для GH та 1,23 м для GM.

Таблиця 3.4

Визначення різниці горизонтальних прокладень між контрольними точками та СКП на основі GM для ділянки траси М-03 Харків-Валки

№	Координати	L_r (QGIS), м	L_r (GM), м	ΔL_r (QGIS-GM), м	$(\Delta L_r)^2$ (QGIS-GM), м ²
1	2	3	4	6	8
1	49.9094772, 35.7568418				
		150,13	150	0,13	0,02
2	49.908204, 35.756148				
		149,56	150	-0,44	0,19
3	49.90696, 35.755372				

Продовження таблиці 3.4

1	2	3	4	6	8
		148,9	150	-1,10	1,21
4	49.905751, 35.75447				
		146,59	150	-3,41	11,63
5	49.904604, 35.753465				
		150,09	150	0,09	0,01
6	49.90348, 35.752309				
		150,7	150	0,70	0,49
7	49.902349, 35.751154				
		150,98	150	0,98	0,96
8	49.90119, 35.75006				
		149,27	150	-0,73	0,53
9	49.900033, 35.749014				
		149,98	150	-0,02	0,0004
10	49.898882, 35.74792				
		147,98	150	-2,02	4,08
11	49.897763, 35.746806				
		149,67	150	-0,33	0,11
12	49.896639, 35.745661				
		150,59	150	0,59	0,35
13	49.895507, 35.744512				
		149,63	150	-0,37	0,14
14	49.894376, 35.743383				
Середнє значення квадратів різниць					1,52
СКП					1,23
Частка від загальної довжини					0,06%

Таким чином, найменші відхилення зафіксовано для моделі GN, що вказує на її відносно вищу точність серед досліджуваних онлайн-платформ.

З метою забезпечення об'єктивного порівняння аналогічні обчислення були виконані для частини автомобільної дороги I-189, розташованої в штаті

Вермонт (північний схід США), з використанням того самого підходу та структури аналізу. Впродовж останніх півтора десятиліть територія США практично повністю була охоплена лазерним скануванням різної щільності. Відповідні дані зберігаються у відкритому доступі в рамках бази даних USGS [140].

У цьому дослідженні точність використаних даних підтверджено, зокрема, результатами роботи В. Глотова та ін. [7], де вказується, що точність аеролазерного сканування (зі сканерів, встановлених на літальних апаратах) є співмірною з точністю наземного мобільного лазерного сканування. Тобто дані цього типу можуть бути використані як високоточна основа для проведення розрахунків.

Для аналізу відрізків дороги було поділено на 16 сегментів орієнтовною довжиною по 150 метрів (рис. 3.3). У координатній системі NAD 83 довжина горизонтального прокладення склала 2405,3 метра, а з урахуванням висоти – 2406,9 метра.



Рисунок 3.3 – Положення контрольних точок сегментів та загальної площинної геометрії траси I-189 на фоні лазерного знімання та шару OSM Standard в QGIS.

Для подальших розрахунків (табл. 3.5, 3.6) координати контрольних точок було трансформовано із NAD 83 до WGS 84 у середовищі QGIS. За результатами трансформації довжина того самого відрізка, обчислена за допомогою інструменту Measure Line у WGS 84, склала 2399,31 метра, а з

урахуванням висот – 2400,87 метра. Таким чином, орієнтовна похибка, пов'язана із переходом від прямокутної до геоцентричної системи координат, становила близько 6 метрів або 0,25%.

Таблиця 3.5

Визначення різниці горизонтальних прокладень між контрольними точками та СКП на основі OSM (базова версія) і моделі GH для ділянки траси I-189 у штаті Вермонт, США

№	Координати	L_{Γ} (QGIS), м	L_{Γ} (OSM), м	L_{Γ} (GH), м	ΔL_{Γ} (QGIS- OSM), м	ΔL_{Γ} (QGIS- GH), м	$(\Delta L_{\Gamma})^2$ (QGIS- OSM) ² , м ²	$(\Delta L_{\Gamma})^2$ (QGIS- GH) ² , м ²
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	44.4467237, -73.210236							
		150,99	150	150,64	0,99	0,35	0,98	0,12
2	44.4471742, -73.208446							
		151,43	151	151,1	0,43	0,33	0,18	0,11
3	44.4476225, -73.2066500							
		150,79	150	150,39	0,79	0,40	0,63	0,16
4	44.4480629, -73.2048581							
		149,47	149	149,12	0,47	0,35	0,22	0,12
5	44.4484956, -73.2030802							
		145,97	148	145,86	-2,03	0,11	4,12	0,01
6	44.44885, -73.201314							
		150,97	150	150,64	0,97	0,33	0,93	0,11
7	44.4490728, -73.1994436							
		150,73	150	150,33	0,73	0,40	0,53	0,16
8	44.4492349, -73.1975635							
		150,42	150	150,03	0,42	0,39	0,18	0,15

Продовження таблиці 3.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9	44.4494046, -73.1956886							
		151,55	151	151,15	0,55	0,40	0,30	0,16
10	44.4495686, -73.1937986							
		149,45	149	149,01	0,45	0,44	0,20	0,20
11	44.449749, -73.191938							
		149,74	149	149,38	0,74	0,36	0,55	0,13
12	44.449889, -73.190067							
		154,07	154	153,68	0,07	0,39	0,004	0,15
13	44.449946, -73.188133							
		150,53	150	150,09	0,53	0,44	0,28	0,19
14	44.449989, -73.186243							
		147,56	146	146,89	1,56	0,67	2,44	0,45
15	44.450141, -73.184407							
		144,26	143	143,45	1,26	0,81	1,580	0,65
16	44.450626, -73.182732							
		151,40	151	150,96	0,40	0,44	0,160	0,19
17	44.451426, -73.181205							
Середнє значення квадратів різниць							0,83	0,19
СКП							0,91	0,44
Частка від загального							0,038%	0,018%

Таблиця 3.6

Визначення різниці горизонтальних прокладень між контрольними точками та СКП на основі GM для ділянки траси I-189 у штаті Вермонт, США

№	Координати	L_r (QGIS), м	L_r (GM), м	ΔL_r (QGIS-GM), м	$(\Delta L_r)^2$ (QGIS-GM), м ²
1	2	3	4	6	8
1	44.4467237, -73.210236				

Продовження таблиці 3.6

1	2	3	4	6	8
		150,99	150,88	0,11	0,01
2	44.4471742, -73.208446				
		151,43	149,96	1,47	2,15
3	44.4476225, -73.2066500				
		150,79	150,88	-0,08	0,01
4	44.4480629, -73.2048581				
		149,47	149,05	0,42	0,17
5	44.4484956, -73.2030802				
		145,97	143,87	2,10	4,42
6	44.44885, -73.201314				
		150,97	150,88	0,09	0,01
7	44.4490728, -73.1994436				
		150,73	149,96	0,77	0,59
8	44.4492349, -73.1975635				
		150,42	149,96	0,46	0,21
9	44.4494046, -73.1956886				
		151,55	150,88	0,67	0,45
10	44.4495686, -73.1937986				
		149,45	149,05	0,40	0,16
11	44.449749, -73.191938				
		149,74	149,96	-0,22	0,05
12	44.449889, -73.190067				
		154,07	153,92	0,14	0,02
13	44.449946, -73.188133				
		150,53	149,96	0,57	0,32
14	44.449989, -73.186243				
		147,56	146,91	0,65	0,42
15	44.450141, -73.184407				
		144,26	143,87	0,39	0,15

Продовження таблиці 3.6

1	2	3	4	6	8
16	44.450626, -73.182732				
		151,40	150,88	0,52	0,27
17	44.451426, -73.181205				
Середнє значення квадратів різниць					0,59
СКП					0,77
Частка від загального					0,032%

Порівняння довжин, отриманих у QGIS на основі лазерного сканування, з результатами, розрахованими за допомогою онлайн-картографічних сервісів, виявило наступні розбіжності. Для OSM відхилення коливаються в межах від -2,03 до +1,56 метра, для GH – від +0,11 до +0,81 метра, а для GM – від -0,22 до +2,10 метра. Середні значення квадратів різниць між довжинами ділянок становлять 0,83 м² для OSM, 0,19 м² для GH, 0,59 м² для GM. Ці показники становлять відповідно 0,038%, 0,018% та 0,32% відносно загальної довжини горизонтального прокладення. Середньоквадратична похибка (СКП) становить 0,91 м для OSM, 0,44 м для GH та 0,77 м для GM.

Отримані значення підтверджують, що найменші розбіжності у визначенні довжин було зафіксовано для платформи GH – як у межах України, так і на ділянці у США. Крім того, за результатами розрахунків встановлено, що всі отримані значення довжин, розраховані за допомогою OSM, GH і GM, мають відхилення, які перевищують похибку трансформації систем координат (близько 0,25%). Це свідчить про те, що існує декілька джерел похибки, де трансформація системи координат виступає однією з них. Водночас характер розбіжностей не демонструє сталих закономірностей, що унеможливило застосування універсальних коригувальних коефіцієнтів для приведення значень до еталонних.

3.2. Визначення впливу орографічних умов на точність визначення довжин автошляхів

На третьому етапі експерименту теза про те, що рельєф є головним природним чинником, що формує конфігурацію дорожньої мережі перевіряється шляхом оцінки впливу ступеня деталізації моделі поверхні на точність вимірювання довжин автошляхів. Основою для проведення аналізу розбіжностей між розрахунками довжин автошляхів на територіях із різним рельєфом було обрано дані лазерного сканування через можливість зміни детальності сканування шляхом зміни щільності точок.

Розрахунки виконано як за формулами, так і у середовищі QGIS послідовно за наступними кроками:

1. Підготовка вихідних даних.
2. Встановлення початкової щільності (ρ) і середнього кроку між точками ($\bar{d}$) (інструмент PDAL info для розрахунку кількості точок та меж із подальшим розрахунком відношення кількості точок до площі полігону).
3. Формування полігону вздовж маршруту (через інструмент Create Polygon).
4. Формування вісі маршруту як серединної лінії полігону (інструмент Polygon to centerline).
5. Визначення кількості точок на маршруті (n), базової довжини горизонтального прокладення (виділено напівжирним у рядку L_1) (інструмент Points to Path та Add Geometry Attributes) та базової довжини з урахуванням висоти точок (виділено напівжирним шрифтом у рядку L_2) при найбільшій щільності точок (інструмент Profile Tool).
6. Систематичне розрідження із кратністю 2 ($S \sim 2$) або іншою, при якій вибиралася кожна друга чи інша у послідовності точка з попереднього набору (демо-версія додатку LASTools, інструмент las2las).
7. Розрахунок довжини горизонтального прокладення (L_1) (інструмент Points to Path та Add Geometry Attributes) та довжини з урахуванням висоти (L_2) (Profile Tool) за розрідженими хмарами точок.

8. Розрахунок абсолютної різниці довжини за формулою :

$$\Delta L = L_{\text{базова}} - L_{\text{розрідж.}} \quad (3.2),$$

де: $L_{\text{базова}}$ – довжина, розрахована за хмарою точок найбільшої щільності;

$L_{\text{розрідж.}}$ – довжина, розрахована за хмарою точок із зменшеною щільністю.

9. Розрахунок відносної похибки за формулою:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_{\text{базова}}} \times 100 \% \quad (3.3),$$

де: ΔL – абсолютна різниці довжини;

$L_{\text{базова}}$ – довжина, розрахована за хмарою точок найбільшої щільності.

Для території США лазерне сканування деяких її частин, часто гірських, проводилось із більшою щільністю точок. Одна із них – частина гірської системи Кордильєр між містами Сакраменто (штат Каліфорнія) і Рено (штат Невада). Через таку територію прокладено ділянку траси I-80, яку було обрано для аналізу. Початок ділянки має координати $39^{\circ} 6' 36.28''$ пн.ш., $120^{\circ} 56' 44.91''$ зх.д., кінець – $39^{\circ} 8' 43.74''$ пн.ш., $120^{\circ} 54' 40.58''$ зх.д. Дорога має середній ухил близько 5%.

Обрана ділянка траси розміщена на шести файлах лазерного сканування, які було завантажено із сайту USGS [140]. Етап підготовки включав об'єднання та обрізання файлів лазерного сканування по лінії вісі траси і виділення точок потрібного класу, видалення точок, що спотворювали геометрію (рис. 3.4, 3.5). Було отримано 10297 точок різних класів, з яких клас «тверда поверхня» мають 5419 точок. Прибравши точки, які спотворювали геометрію залишилось 4633 точки, середня відстань між якими склала 1 метр 20 см. Базові значення довжини із врахуванням висоти і щільності точок 0,69 на м^2 – 5514,78 метра, довжина горизонтального прокладення склала 5507,23 метри, середній ухил 4,93%.

Шляхом послідовного проріджування хмари точок модель рельєфу ставала більш спрощеною, а отримані довжини порівнювалися з базовим значенням. Для кожного кроку проріджування фіксували чотири ключові параметри: фактичну щільність лазерних відбитків на площі 1 м^2 , середній

інтервал між сусідніми точками вздовж вісі траси, обчислену довжину горизонтального прокладання, обчислену довжину із врахуванням висоти точок (табл. 3.8).

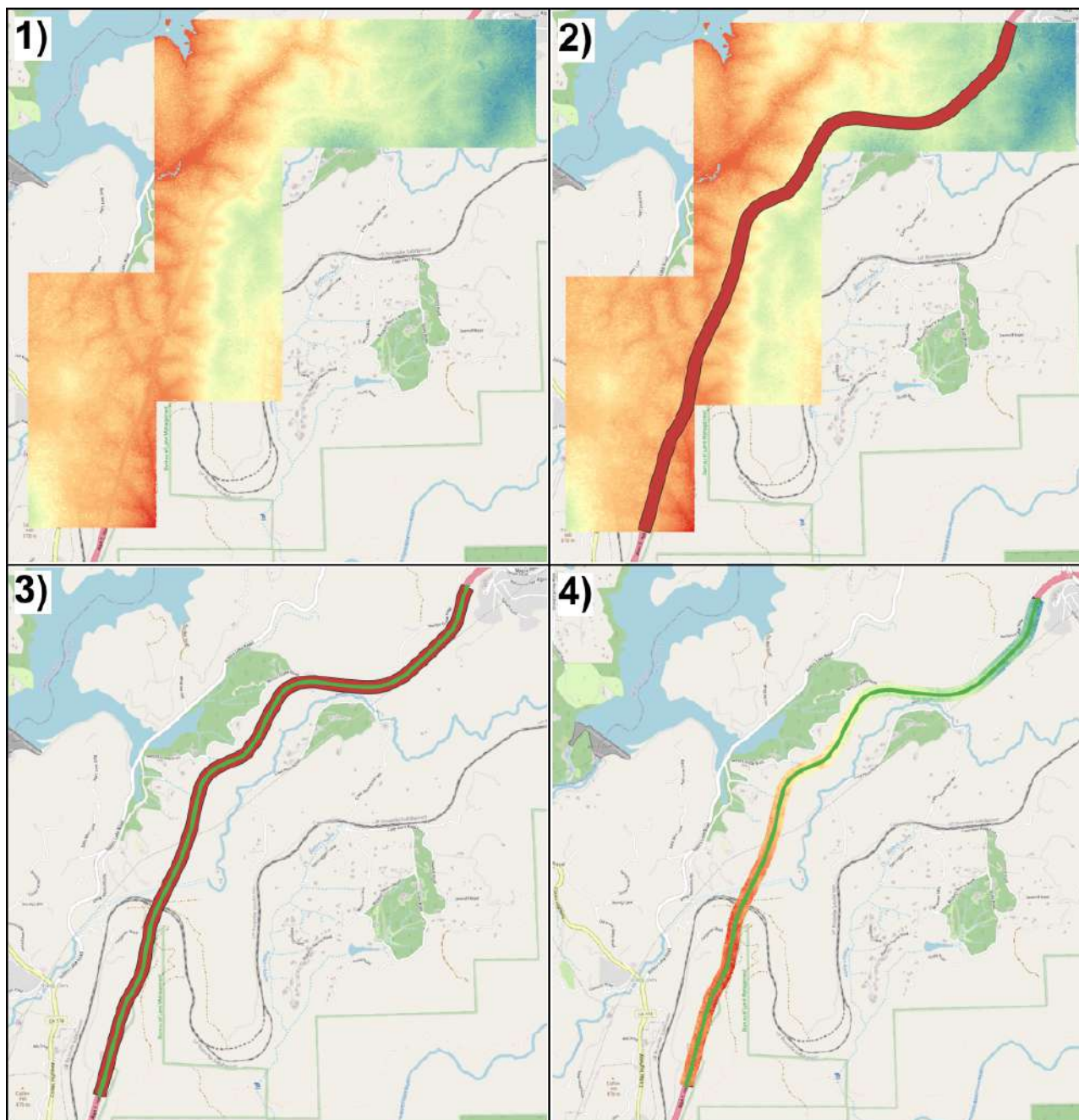


Рисунок 3.4 – Етапи підготовки просторових даних гірської місцевості, де прокладено ділянку траси І-80 для подальших розрахунків: 1) об'єднання хмар точок у цілісний шар; 2) створення полігону, де прокладено ділянку траси; 3) отримання лінії вісі траси як центральної лінії полігону; 4) обрізання файлів лазерного сканування задля повторення геометрії траси (лазерне знімання USGS та шар OSM Standard із візуалізацією в QGIS).

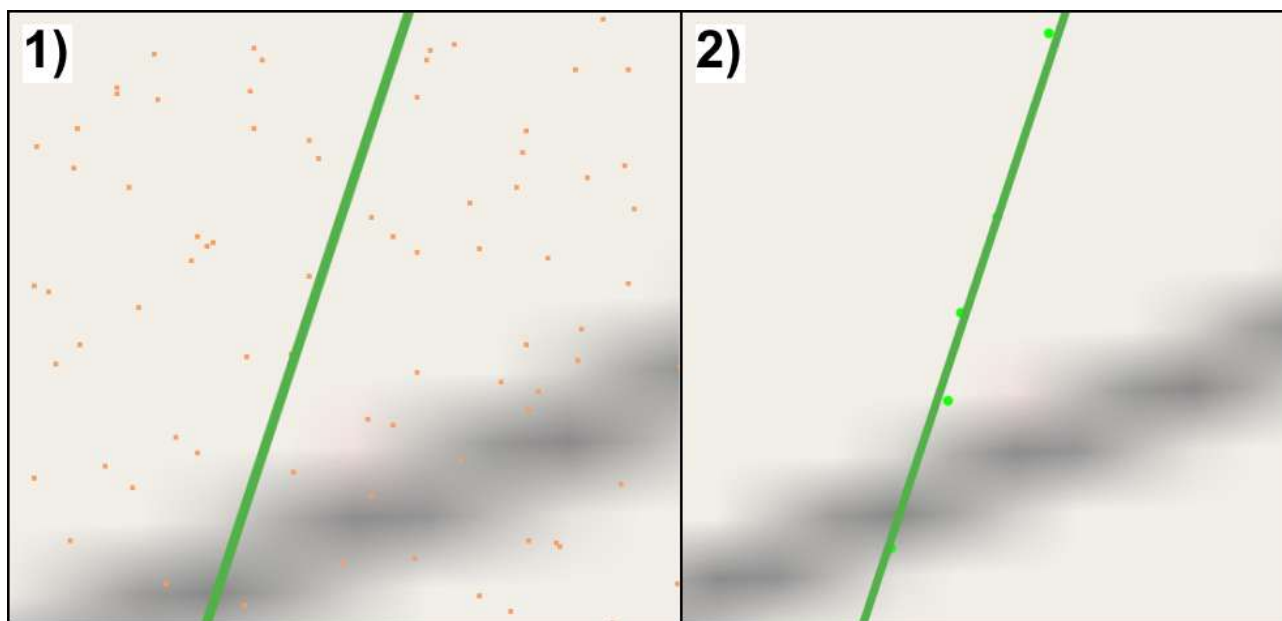


Рисунок 3.5 – Етапи підготовки просторових даних гірської місцевості, де прокладено ділянку траси І-80 для подальших розрахунків: 1) визначення точок, що відповідають класу «тверда поверхня»; 2) видалення точок, що спотворюють геометрію і використання залишку точок, що знаходяться вздовж вісі траси для подальших розрахунків (лазерне знімання USGS та шар OSM Standard із візуалізацією в QGIS).

Таблиця 3.8

Залежність точності передачі геометричних параметрів автодоріг від точності передачі орографічних параметрів при зміні щільності точок під час лазерного сканування для ділянки траси І-80 в гірській місцевості на території США

	$S \sim 1,25$						$S \sim 2$		
ρ (точок/м ²)	0,69	0,44	0,29	0,19	0,12	0,08	0,02	0,005	0,001
$\bar{d}$ (м)	1,2	1,5	1,85	2,3	2,9	3,6	7	13,7	26,8
L_1 (м)	5507,23	5491,93	5485,63	5478,74	5477,09	5473,98	5470,87	5469,91	5468,23
ΔL (м)	-	15,30	21,60	28,49	30,14	33,25	36,36	37,32	39,00
ε (%)	-	0,28	0,39	0,52	0,55	0,6	0,66	0,68	0,71
L_2 (м)	5514,78	5498,83	5492,12	5484,96	5483,09	5479,79	5476,47	5475,45	5473,74
ΔL (м)	-	15,95	22,66	29,82	31,69	34,99	38,31	39,33	41,04
ε (%)	-	0,29	0,41	0,54	0,57	0,63	0,69	0,71	0,74
n	4633	3702	2962	2370	1896	1517	778	400	205

Зменшуючи густоту точок з 0,69 точки/м² при інтервалі близько 1,2 метри до 0,001 точки/м² при інтервалі близько 26,8 метрів спостерігається плавне, але монотонне скорочення розрахункової довжини горизонтального прокладення від 5491,93 метри до 5468,23 метрів, тобто втрачається від 15 до 39 метрів маршруту, що відповідає зменшенню точності від 0,28% до 0,71%. Аналогічна тенденція фіксується для довжини із врахуванням висоти точок, коли розбіжність зростає з 0,29% до 0,74%.

Основний вплив на зміну кінцевої розрахованої довжини чинить згладжування вертикальних і горизонтальних нерівностей рельєфу при зменшенні інтервалу між точками до 7 метрів або щільності 0,02 точки/м², тоді як загальна конфігурація траси зберігається достатньо стабільною при високій позиційній точності. Проте за інтервалів понад 20 м або щільності нижче 0,002-0,001 точки/м² накопичувальний ефект спрощення стає помітним із розбіжністю 0,71% та більше.

Доступні файли лазерного сканування для рівнинних ділянок в США мають таку саму або меншу щільність точок, тому для порівняння і аналізу розходження довжин з урахуванням висоти точок і горизонтальних прокладень на ділянках доріг, що проходять рівнинним рельєфом розглянуто файли лазерного сканування для частини ділянки траси М-03 Харків-Валки через більшу щільність точок.

Підготовка файлів для аналізу включала формування полігону та лінії вісі траси, фільтрування точок, відокремлення тих, що не відповідають класу «тверда поверхня» і відокремлення точок, що при послідовному з'єднанні знаходяться осторонь від основного напрямку вісі (рис. 3.6, 3.7). У результаті було отримано послідовність із 31192 точок із середнім інтервалом між ними близько 6 см та щільністю 278 точок/м². Базове значення довжини із врахуванням висоти і щільності точок склало 2009,88 метрів, довжина горизонтального прокладення – 2005,78 метра, середній ухил 2,29%.



Рисунок 3.6 – Етапи підготовки просторових даних рівнинної місцевості, де прокладено ділянку траси М-03 для подальших розрахунків: 1) завантаження даних лазерного сканування ; 2) створення полігону, де прокладено ділянку траси; 3) отримання лінії вісі траси як центральної лінії полігону (лазерне знімання USGS та шар OSM Standard із візуалізацією в QGIS).

При першому проріджуванні хмари точок в два рази до кроку у 13 см між точками або 70 точок/м² значення довжини дороги з урахуванням рельєфу зменшилось на 0,25%, а значення горизонтального прокладення зменшилось на 0,14%. При максимальному розрідженні до 3 точок на два кілометри, тобто розрахунок довжини на основі координат точок початку, середини і кінця, метрична точність результату розрахунку довжини дороги з урахуванням висоти знижується на 0,64%, а довжини горизонтального прокладення на 0,45% (табл. 3.9).

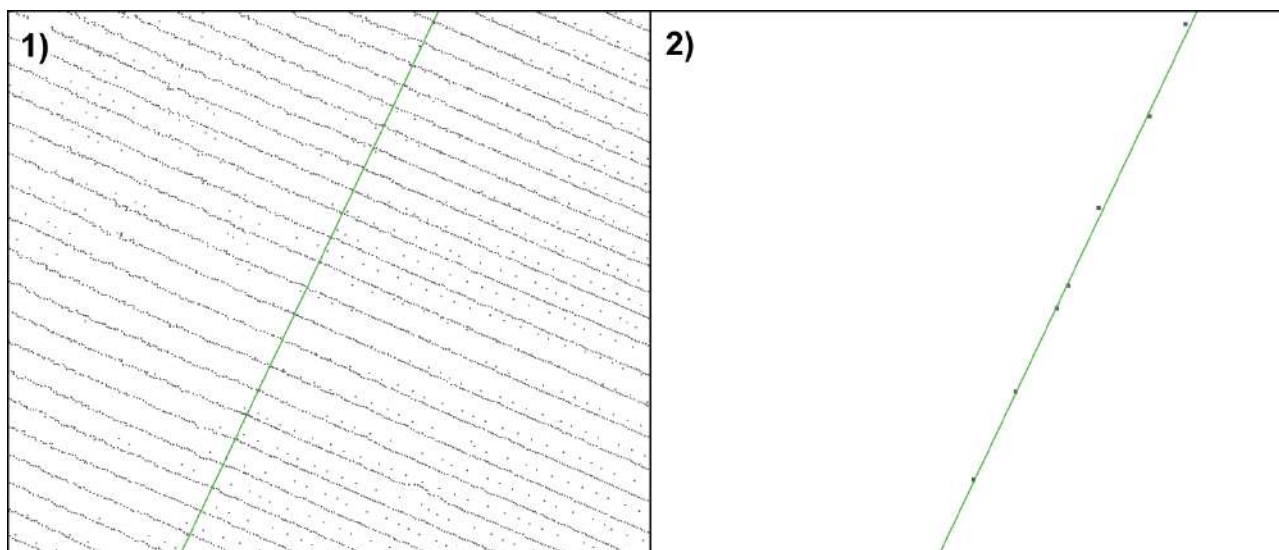


Рисунок 3.7 – Етапи підготовки просторових даних рівнинної місцевості, де прокладено ділянку траси М-03 для подальших розрахунків: 1) завантаження даних лазерного сканування ; 2) створення полігону, де прокладено ділянку траси; 3) отримання лінії вісі траси як центральної лінії полігону (лазерне знімання USGS та шар OSM Standard із візуалізацією в QGIS).

Таблиця 3.9

Залежність точності передачі геометричних параметрів автодоріг від точності передачі орографічних параметрів при зміні щільності точок під час лазерного сканування для ділянки траси М-03 на рівнинній місцевості на території України

	$S_{\sim 2}$						$S_{\sim 4}$		$S_{\sim 21}$
ρ (точок/м ²)	278	70	16	4	1	0,25	0,015	0,009	0,000001
$\bar{d}$ (м)	0,06	0,13	0,26	0,51	1	2	8	32	3
L_1 (м)	2005,78	2002,90	2002,18	2002,01	2001,96	2001,94	2001,93	2001,84	1996,82
ΔL (м)	-	2,88	3,60	3,77	3,82	3,84	3,85	3,94	8,95
ε (%)	-	0,14	0,18	0,19	0,19	0,19	0,19	0,2	0,45
L_2 (м)	2009,88	2004,77	2003,43	2003,12	2003,03	2003,01	2002,98	2002,89	1997,02
ΔL (м)	-	5,11	6,45	6,76	6,85	6,87	6,90	6,99	12,86
ε (%)	-	0,25	0,32	0,34	0,34	0,34	0,34	0,35	0,64
n	31192	15597	7799	3901	1951	977	245	63	3

Таким чином, розходження довжин на гірських дорогах зростає в 2–4 рази швидше, ніж на рівнинних, при кожному двократному зменшенні щільності точок. Для запобігання зростанню розбіжності понад 0,35% відстань між точками при використанні лазерного знімання в гірській місцевості має становити від декількох сантиметрів до 1,5 метри або 0,44 точки/м² та щільніше, а на рівнинній від декількох сантиметрів до 8 метрів або 0,015 точок/м² та щільніше.

3.3 Визначення розбіжностей у точності відображення довжин автошляхів при застосуванні різних онлайн-платформ

На четвертому етапі експерименту за допомогою онлайн-ресурсів OSM, GN та GM було виміряно довжини автомагістралей. В США було обрано найдовші магістралі, що проходять у широтному та меридіональному напрямках, їх довжину порівняно із офіційним переліком автошляхів та їх довжин згідно Federal Highway Administration (FHWA) [122]. У межах України виміряно довжини міжнародних автомагістралей і порівняно із даними протяжності із переліку затвердженому Кабінетом Міністрів України [28].

Для експерименту було обрано наступні автошляхи: I-5, I-10, I-40, I-75, I-90, I-95 (рис. 3.8), прокладені як у меридіональному, так і у широтному напрямку, проходять через різноманітні ландшафти та природно-кліматичні зони. Через відсутність переліку офіційно визначених координат початку та кінця автомагістралей їх було визначено автором самостійно виходячи із волонтерських даних платформи OSM. Розрахунок довжин горизонтальних прокладень проводився двома способами: 1) шляхом поділу автомагістралі на сегменти і розрахунком суми довжини горизонтальних прокладень цих сегментів для отримання загальної довжини; 2) шляхом розрахунку довжини маршруту від початкової до кінцевої точки з його подальшим коригуванням.

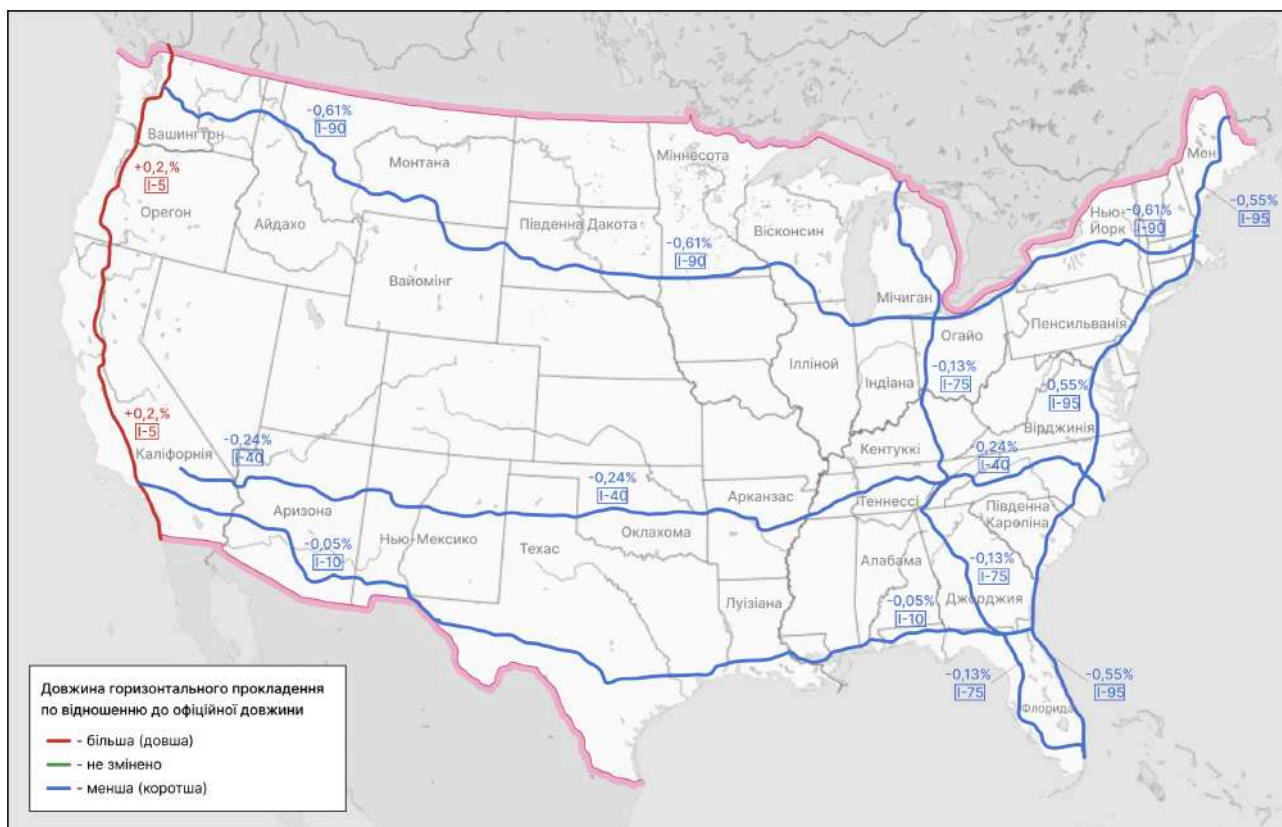


Рисунок 3.8 – Схематичне положення обраних трас на території США із зазначенням відношення їх розрахованої довжини за даними онлайн-платформ до офіційної довжини.

Автомагістраль I-5 прокладено вздовж узбережжя Тихого океану. Її початок знаходиться на прибережних низькогірних схилах Сан-Дієго, що покриті чагарником. Далі вона спрямована через широку, майже рівнинну центральну частину штату Каліфорнія до гористої північної частини Каліфорнії та південної частини штату Орегон. Після перевалів решта траси пролягає по рівнинній території поступово спускаючись у фьордоподібне пониження П'юджет-Саунд у штаті Вашингтон (рис. 3.9.). Її офіційна довжина складає 2222,97 км.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів ($\sum L_{\text{сегментів}}$) траси I-5 за OSM складає 2228,6 км, що на 5,63 км або 0,25% більше за офіційну довжину. За GN це значення складає 2227,13 км, що на 4,16 км або 0,19% більше за офіційну довжину. За GM це значення складає 2227,51 км, що на 4,54 км або 0,20% більше за офіційну довжину.



Рисунок 3.9 – Профіль рельєфу території, якою прокладено трасу I-5, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Але у разі проведення розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої із коригуванням маршруту ($L_{\text{маршрут}}$) це значення відрізняється і за OSM складає 2225 км, що на 2,03 км або 0,09% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 2227 км, що на 4,03 км або 0,18% більше за офіційну довжину. За GM це значення складає 2224 км, що на 1,03 км або 0,05% більше за офіційну довжину (таблиця 3.10).

Таблиця 3.10

Порівняння довжини горизонтального прокладення магістралі I-5 на території США за даними FHWA, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
1	2	3	4	5
San Diego, CA (32.542523, -117.029064)	San Diego, CA (32.753103, -117.199033)	31,6	31,55	31,4
San Diego, CA (32.753103, -117.199033)	Mission Viejo, CA (33.594062, -117.672472)	112	111,91	111,21
Mission Viejo, CA (33.594062, -117.672472)	Los Angeles, CA (34.09733, -118.24546)	80,9	80,89	80,95
Los Angeles, CA (34.09733, -118.24546)	Santa Clarita, CA (34.386594, -118.568914)	46,1	46,11	48,28
Santa Clarita, CA (34.386594, -118.568914)	Bakersfield, CA (35.256947, -119.213522)	122	121,86	121,83
Bakersfield, CA (35.256947, -119.213522)	Cantua Creek, CA (36.456711, -120.413063)	173	173,30	173,81
Cantua Creek, CA (36.456711, -120.413063)	Tracy, CA (37.591128, -121.333628)	153	152,90	152,89
Tracy, CA (37.591128, -121.333628)	Sacramento, CA (38.664332, -121.537592)	128	127,94	127,94

Продовження таблиці 3.10

1	2	3	4	5
Sacramento, CA (38.664332, -121.537592)	Redding, CA (40.576213, -122.360316)	246	245,62	246,23
Redding, CA (40.576213, -122.360316)	Hornbook, CA (42.005439, -122.615324)	192	191,72	191,51
Hornbook, CA (42.005439, -122.615324)	Springfield, OR (44.054103, -123.050052)	311	310,95	310,60
Springfield, CA (44.054103, -123.050052)	Portland, OR (45.618048, -122.675088)	187	187,25	185,07
Portland, OR (45.618048, -122.675088)	Seattle, WA (47.581457, -122.319292)	264	263,45	263,93
Seattle, WA (47.581457, -122.319292)	Blaine, WA (49.002076, -122.756028)	182	181,67	181,86
$\sum L$ сегментів, км		2228,6	2227,13	2227,51
L маршрут, км		2225	2227	2224
L офіц (FHWA), км		2222,97		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		5,63	4,16	4,54
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		+0,25	+0,19	+0,20
L маршрут - L офіц, км		2,03	4,03	1,03
L маршрут / L офіц, %		+0,09	+0,18	+0,05

Автомагістраль I-10 прокладено від південно-західного до південно-східного узбережжя США. Західна половина дороги пролягає через плоскогірний рельєф пустель Мохаве та Сонора. Далі траса прокладена по рівнинах, висота яких знижується переходячи у пологі алювіальні рівнини узбережжя Мексиканської затоки і далі на схід через дельти річок на території штатів Луїзіана і Флорида, що характеризуються заболоченими низинами та піщаними бар'єрними островами (рис. 3.10). Траса має офіційну довжину 3959,53 км.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів траси I-10 за OSM складає 3954 км, що на 5,53 км або 0,14% менше за офіційну довжину. За GN це значення складає 3954,49 км, що на 5,04 км або 0,13% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 3957,54 км, що на 1,99 км або 0,05% менше за офіційну довжину.



Рисунок 3.10 – Профіль рельєфу території, якою прокладено трасу I-10, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Довжина горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої із коригуванням маршруту за OSM складає 3921 км, що на 38,53 км або 0,97% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 3915 км, що на 44,53 км або 1,12% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 3947,72 км, що на 11,81 км або 0,3% менше за офіційну довжину (таблиця 3.11).

Таблиця 3.11

Порівняння довжини горизонтального прокладення магістралі I-10 на території США за даними FHWA, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
1	2	3	4	5
Santa Monica, CA (34.016665, -118.502204)	Los Angeles, CA (34.028555, -118.228759)	27	27,02	27,20
Los Angeles, CA (34.028555, -118.228759)	Alhambra, CA (34.071482, -118.122576)	13	12,97	16,09
Alhambra, CA (34.071482, -118.122576)	Beaumont, CA (33.927717, -116.981907)	114	113,53	113,62
Beaumont, CA (33.927717, -116.981907)	Blythe, CA (33.606966, -114.605001)	232	231,55	231,75
Blythe, CA (33.606966, -114.605001)	Phoenix, AZ (33.461057, -112.038727)	243	243,38	243,01
Phoenix, AZ (33.461057, -112.038727)	Tucson, AZ (32.238458, -110.984854)	177	177,45	177,03
Tucson, AZ (32.238458, -110.984854)	Las Cruces, NM (32.275977, -106.759401)	445	445,07	445,79
Las Cruces, NM (32.275977, -106.759401)	San Antonio, TX (29.395843, -98.493942)	958	958,14	957,56

Продовження таблиці 3.11

1	2	3	4	5
San Antonio, TX (29.395843, -98.493942)	Houston, TX (29.76701, -95.360279)	315	314,79	313,82
Houston, TX (29.76701, -95.360279)	Baton Rouge, LA (30.366802, -91.046376)	445	444,78	444,18
Baton Rouge, LA (30.366802, -91.046376)	New Orleans, LA (29.957987, -90.094696)	110	110,48	110,40
New Orleans, LA (29.957987, -90.094696)	Tallahassee, FL (30.494406, -84.27402)	618	617,95	617,99
Tallahassee, FL (30.494406, -84.27402)	Jacksonville, FL (30.320772, -81.69301)	257	257,39	259,10
$\sum L$ сегментів, КМ		3954	3954,49	3957,54
L маршрут, КМ		3921	3915	3947,72
L офіц (FHWA), КМ		3959,53		
$\sum L$ сегментів - L офіц, КМ		-5,53	-5,04	-1,99
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-0,14	-0,13	-0,05
L маршрут - L офіц, КМ		-38,53	-44,53	-11,81
L маршрут / L офіц, %		-0,97	-1,12	-0,30

Початок автомагістралі I-40 знаходиться у місті Барстоу, штат Каліфорнія (Barstow, CA). Вона прокладена через плоскорігний рельєф пустелі Мохаве і далі на схід через розчленоване каньйонами плато штатів Невада, Аризона, Нью-Мексико пролягає поміж прерій Центральних рівнин. Східна частина прокладена серед гірського рельєфу гір Аппалачі, річкових ущелин і долин, після чого спрямована до прибережної низовинної частини на території штату Північна Кароліна (рис. 3.11). Офіційна довжина складає 4114,46 км.



Рисунок 3.11 – Профіль рельєфу території, якою прокладено трасу I-40, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів траси I-40 за OSM складає 4104,30 км, що на 10,16 км або 0,25% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 4101,50 км, що на 12,95 км або 0,32% менше за офіційну довжину (табл. 3.12).

За GM це значення складає 4104,40 км, що на 10,06 км або 0,24% менше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої із коригуванням маршруту це значення за OSM складає 4113,3 км, що на 2,16 км або 0,05% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 4107 км, що на 7,46 км або 0,18% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 4105,44 км, що на 9,03 км або 0,22% менше за офіційну довжину.

Таблиця 3.12

Порівняння довжини горизонтального прокладення магістралі I-40 на території США за даними FHWA, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
1	2	3	4	5
Barstow, CA (34.885795, -117.01435)	Needles, CA (34.841407, -114.612361)	229	229,01	228,5
Needles, CA (34.841407, -114.612361)	Flagstaff, AZ (35.175567, -111.643155)	335	335,29	335
Flagstaff, AZ (35.175567, -111.643155)	Lupton, AZ (35.354498, -109.05525)	261	260,64	260,7
Lupton, AZ (35.354498, -109.05525)	Albuquerque, NM (35.105598, -106.644596)	256	255,85	255,9
Albuquerque, NM (35.105598, -106.644596)	Amarillo, TX (35.193555, -101.841743)	458	457,71	458
Amarillo, TX (35.193555, -101.841743)	Oklahoma City, OK (35.456195, -97.520549)	414	413,97	412
Oklahoma City, OK (35.456195, -97.520549)	Conway, AR (35.095658, -92.426998)	494	493,49	494
Conway, AR (35.095658, -92.426998)	Memphis, TN (35.149809, -90.024031)	258	258,14	257,5
Memphis, TN (35.149809, -90.024031)	Nashville, TN (36.149440, -86.773243)	340	339,55	339,6
Nashville, TN (36.149440, -86.773243)	Knoxville, TN (35.968277, -83.929293)	286	285,41	284,9

Продовження таблиці 3.12

1	2	3	4	5
Knoxville, TN (35.968277, -83.929293)	Asheville, NC (35.557381, -82.531987)	179	178,67	185
Asheville, NC (35.557381, -82.531987)	Winston-Salem, NC (36.064961, -80.236701)	229	228,65	228,5
Winston-Salem, NC (36.064961, -80.236701)	Durham, NC (35.90944, -78.978829)	128	128,02	127,1
Durham, NC (35.90944, -78.978829)	Raleigh, NC (35.745627, -78.592991)	46,3	46,25	46,2
Raleigh, NC (35.745627, -78.592991)	Murphyville, NC (34.272792, -77.868538)	191	190,85	191,5
$\sum L$ сегментів, км		4104,30	4101,50	4104,40
L маршрут, км		4112,3	4107	4105,44
L офіц (FHWA), км		4114,46		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-10,16	-12,95	-10,06
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-0,25	-0,32	-0,24
L маршрут - L офіц, км		-2,16	-7,46	-9,03
L маршрут / L офіц, %		-0,05	-0,18	-0,22

Початок автомагістралі I-75 знаходиться на південно-східному узбережжі штату Флорида. Шлях прокладено через субтропічну прибережну рівнинну місцевість і у напрямку гірської країни Аппалачі із помірно-вологими листяними лісами. Далі на північ вона пролягає через територію із континентальним кліматом серед карстових плато, перетинає річкові долини і поступово направлена до льодовиково-моренних рівнин, закінчуючись на півострові Верхній на кордоні із Канадою у штаті Мічиган (рис. 3.12). Офіційна довжина складає 2875,04 км.



Рисунок 3.12 – Профіль рельєфу території, якою прокладено трасу I-75, згенерований у ГН на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів траси I-75 за OSM складає 2878,4 км, що на 3,36 км або 0,12% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 2873,83 км, що на 1,21 км або 0,04% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 2871,39 км, що на 3,65 км або 0,13% менше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої із коригуванням маршруту це значення за OSM складає 2858 км, що на 17,04 км або 0,59% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 2867 км, що на 8,04 км або 0,59% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 2819,57 км, що на 55,47 км або 1,93% менше за офіційну довжину (табл. 3.13).

Таблиця 3.13

Порівняння довжини горизонтального прокладення магістралі I-75 на території США за даними FHWA, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
1	2	3	4	5
Hialeah, FL (25.896704, -80.324241)	Fort Myers, FL (26.622065, -81.805486)	219	219,37	218,87
Fort Myers, FL (26.622065, -81.805486)	Brandon, FL (27.966184, -82.326159)	197	197,71	196,34
Brandon, FL (27.966184, -82.326159)	Ocala, FL (29.177532, -82.184701)	148	148,35	148,38
Ocala, FL (29.177532, -82.184701)	Jennings, FL (30.626374, -83.172442)	194	194,14	194,73
Jennings, FL (30.626374, -83.172442)	Macon, GA (32.835881, -83.649962)	263	263,38	263,93
Macon, GA (32.835881, -83.649962)	Atlanta, GA (33.691941, -84.402362)	128	122,48	127,46
Atlanta, GA (33.691941, -84.402362)	Ringgold, GA (34.985822, -85.20137)	181	180,81	180,25
Ringgold, GA (34.985822, -85.20137)	Lenoir City, TN (35.867480, -84.255975)	136	136,02	135,99
Lenoir City, TN (35.867480, -84.255975)	Knoxville, TN (35.981944, -83.978685)	30,8	30,76	30,74
Knoxville, TN (35.981944, -83.978685)	Jellico, TN (36.591082, -84.104623)	89,4	89,36	89,32

Продовження таблиці 3.13

1	2	3	4	5
Jellico, TN (36.591082, -84.104623)	Covington, KY (39.092192, -84.522486)	311	310,91	308,99
Covington, KY (39.092192, -84.522486)	Lima, OH (40.700262, -84.078281)	199	198,71	197,95
Lima, OH (40.700262, -84.078281)	Toledo, OH (41.731971, -83.488750)	142	141,96	141,94
Toledo, OH (41.731971, -83.488750)	Detroit, MI (42.338973, -83.054842)	81,2	81,23	81,27
Detroit, MI (42.338973, -83.054842)	Grayling, MI (44.655872, -84.700161)	328	328,11	328,31
Grayling, MI (44.655872, -84.700161)	Sault Ste. Marie, MI (46.508466, -84.360725)	231	230,55	226,92
$\sum L$ сегментів, км		2878,4	2873,83	2871,39
L маршрут, км		2858	2867	2819,57
L офіц (FHWA), км		2875,04		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		3,36	-1,21	-3,65
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		+0,12	-0,04	-0,13
L маршрут - L офіц, км		-17,04	-8,04	-55,47
L маршрут / L офіц, %		-0,59	-0,28	-1,93

Автомагістраль I-90 прокладено від північно-західного узбережжя у штаті Вашингтон до північно-східного узбережжя у штаті Массачусетс. Початок шляху знаходиться біля фьордоподібного пониження П'юджет-Саунд, перетинає Кордильєри, проходить через плато у штатах Вашингтон та Айдахо. Далі вона прокладена через льодовикові долини штату Монтана і територію Великих рівнин, поступово спрямована до льодовикових озерних рівнин Мінесоти, Вісконсину та Іллінойсу. Згодом шлях перетинає рівнинну місцевість, що змінюється на передгірську і гірську у штаті Пенсильванія. Після частини гірської країни Аппалачів дорога знову спрямована через рівнинну територію до прибережної частини у штаті Массачусетс (рис. 3.13). Її офіційна довжина складає 4988,55 км.



Рисунок 3.13 – Профіль рельєфу території, якою прокладено трасу I-90, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів траси I-90 за OSM складає 4964 км, що на 24,55 км або 0,49% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 4961,29 км, що на 27,26 км або 0,55% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 4958,23 км, що на 30,32 км або 0,61% менше за офіційну довжину.

Таблиця 3.14

Порівняння довжини горизонтального прокладення магістралі I-90 на території США за даними FHWA, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
1	2	3	4	5
Seattle, WA (47.592329, -122.325855)	Spokane, WA (47.6526, -117.425746)	448	447,52	445,79
Spokane, WA (47.6526, -117.425746)	Billings, MT (45.791412, -108.475855)	872	871,10	870,66
Billings, MT (45.791412, -108.475855)	Gillette, WY (44.27948, -105.49306)	371	370,33	370,15
Gillette, WY (44.27948, -105.49306)	Sioux Falls, SD (43.608521, -96.736259)	770	769,50	769,27
Sioux Falls, SD (43.608521, -96.736259)	Tomah, WI (43.957527, -90.50396)	532	532,02	532,69
Tomah, WI (43.957527, -90.50396)	Elgin, IL (42.066361, -88.279045)	323	322,99	323,48
Elgin, IL (42.066361, -88.279045)	Fremont, IN (41.735556, -85.002717)	315	315,14	315,43
Fremont, IN (41.735556, -85.002717)	Cleveland, OH (41.491415, -81.687408)	299	298,54	297,73
Cleveland, OH (41.491415, -81.687408)	Buffalo, NY (42.951767, -78.757448)	313	313,44	312,21

Продовження таблиці 3.14

1	2	3	4	5
Buffalo, NY (42.951767, -78.757448)	Utica, NY (43.11111, -75.200205)	301	300,65	300,95
Utica, NY (43.11111, -75.200205)	Albany, NY (42.669882, -73.738481)	146	145,77	145,81
Albany, NY (42.669882, -73.738481)	Westfield, MA (42.145691, -72.738975)	117	116,97	117,00
Westfield, MA (42.145691, -72.738975)	Boston, MA (42.378909, -71.025608)	157	157,32	157,07
$\sum L$ сегментів, км		4964	4961,29	4958,23
L маршрут, км		4969	4962	4958,39
L офіц (FHWA), км		4988,55		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-24,55	-27,26	-30,32
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-0,49	-0,55	-0,61
L маршрут - L офіц, км		-19,55	-26,55	-30,16
L маршрут / L офіц, %		-0,39	-0,53	-0,60

При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої із коригуванням маршруту це значення за OSM складає 4969 км, що на 19,55 км або 0,39% менше за офіційну довжину. За GN це значення складає 4962 км, що на 26,55 км або 0,53% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 4958,39 км, що на 30,16 км або 0,60% менше за офіційну довжину (табл. 3.14).

Автомагістраль I-95 прокладено від південно-східного узбережжя у штаті Флорида до північно-східного кордону з Канадою у штаті Мейн. Вона прокладена через заболочену субтропічну рівнинну місцевість Флориди, спрямована далі на північний схід і пролягає через алювіальні болота та лагуни Джорджії і Південної Кароліни, через широкі естуарії та річкові долини Північної Кароліни, Вірджинії, Меріленду, Делаверу, Пенсильванії, Нью-Джерсі, Нью-Йорку, Коннектикуту. Далі пролягає до кордону із Канадою перетинаючи прибережну рівнину, сформовану товщею морських льодовикових наносів із численними ставками і лагунами, де ближче до кордону з Канадою зустрічається підвищений рельєф із розгалуженою річковою системою (рис 3.14). Її офіційна довжина складає 3067,45 км.



Рисунок 3.14 – Профіль рельєфу території, якою прокладено трасу I-95, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів траси I-95 за OSM складає 3039,7 км, що на 27,65 км або 0,90% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 3038,40 км, що на 28,95 км або 0,94% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 3050,35 км, що на 17,00 км або 0,55% менше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої із коригуванням маршруту це значення за OSM складає 3032 км, що на 35,35 км або 1,15% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 3034 км, що на 33,35 км або 1,09% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 3040,05 км, що на 27,30 км або 0,89% менше за офіційну довжину (табл. 3.15).

Таблиця 3.15

Порівняння довжини горизонтального прокладення магістралі I-95 на території США за даними FHWA, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
1	2	3	4	5
Miami, FL (25.749222, -80.212333)	Savannah, GA (32.069789, -81.247881)	764	764,60	774,09
Savannah, GA (32.069789, -81.247881)	Richmond, VA (37.543539, -77.427687)	755	755,10	754,78
Richmond, VA (37.543539, -77.427687)	Alexandria, VA (38.802596, -77.096941)	160	160,43	160,45
Alexandria, VA (38.802596, -77.096941)	Baltimore, MD (39.269317, -76.633466)	0	0,00	87,55

1	2	3	4	5
Baltimore, MD (39.269317, -76.633466)	Wilmington, DE (39.745208, -75.559274)	204	203,85	116,19
Wilmington, DE (39.745208, -75.559274)	Philadelphia, PA (39.898356, -75.181765)	40,5	40,50	39,75
Philadelphia, PA (39.898356, -75.181765)	Florence, NJ (40.100666, -74.788579)	48,1	48,08	47,96
Florence, NJ (40.100666, -74.788579)	Elizabeth, NJ (40.660814, -74.184914)	87,6	87,61	87,55
Elizabeth, NJ (40.660814, -74.184914)	New Rochelle, NY (40.914442, -73.783161)	56,9	56,92	58,58
New Rochelle, NY (40.914442, -73.783161)	New Haven, CT (41.29221, -72.920338)	90,4	90,35	90,28
New Haven, CT (41.29221, -72.920338)	Cranston, RI (41.777604, -71.425861)	157	157,09	157,07
Cranston, RI (41.777604, -71.425861)	Foxborough, MA (42.043261, -71.242619)	37,1	37,07	37,01
Foxborough, MA (42.043261, -71.242619)	Portsmouth, NH (43.051982, -70.810499)	145	143,54	145,00
Portsmouth, NH (43.051982, -70.810499)	Auburn, ME (44.036710, -70.271459)	125	125,01	125,05
Auburn, ME (44.036710, -70.271459)	Augusta, ME (44.310321, -69.808548)	54,1	54,05	54,07
Augusta, ME (44.310321, -69.808548)	Bangor, ME (44.794893, -68.803088)	119	118,64	118,61
Bangor, ME (44.794893, -68.803088)	Houlton, ME (46.134871, -67.781248)	196	195,56	196,34
$\sum L_{\text{сегментів}}, \text{ км}$		3039,7	3038,40	3050,35
$L_{\text{маршрут}}, \text{ км}$		3032	3034	3040,05
$L_{\text{офіц}} (\text{FHWA}), \text{ км}$		3067,35		
$\sum L_{\text{сегментів}} - L_{\text{офіц}}, \text{ км}$		-27,65	-28,95	-17,00
$\sum L_{\text{сегментів}} / L_{\text{офіц}}, \%$		-0,90	-0,94	-0,55
$L_{\text{маршрут}} - L_{\text{офіц}}, \text{ км}$		-35,35	-33,35	-27,30
$L_{\text{маршрут}} / L_{\text{офіц}}, \%$		-1,15	-1,09	-0,89

Бачимо, що довжини обраних автомагістралей на території США, розраховані на основі даних електронних карт, не співпадають із офіційними довжинами, а розходження довжин є як додатне, так і від'ємне, та знаходяться у межах від +0,25% до -1,15%. У метричному вираженні різниця між офіційними даними та сумою відрізків горизонтального прокладення за OSM становить від +5,63 км до -27,65 км, за GH від +4,16 км до -28,95 км, за GM від +4,54 км до -30,32 км. Метричне вираження різниці між офіційними даними та горизонтальним прокладенням від початкової до кінцевої точки із коригуванням маршруту за OSM становить від +2,03 км до -38,53 км, за GH від +4,03 км до -44,53 км, за GM від +1,03 км до -55,47 км.

Для відповіді на закономірне запитання: «Чи мають похибки систематичний характер?», було:

- послідовно розраховано відхилення для кожного автошляху;
- визначено середнє зміщення і вибіркове стандартне відхилення;
- сформульовано нульову гіпотезу для перевірки, чи середнє зміщення статистично відрізняється від нуля і як базове припущення, що в даних немає систематичного зсуву;
- обрано рівень значущості;
- проведено t-тест Стюдента, де порівнюється розраховане (t) з критичним згідно таблиці ($t_{крит}$).

У разі, якщо нуль потрапляє в середину інтервалу або значення t по модулю не перевищує критичного порогу, то систематичний зсув не підтверджується і похибка вважається випадковою. У разі, якщо нуль знаходиться поза інтервалом, а емпіричний рівень значущості, тобто імовірність менша за допустиму імовірність помилки першого роду, тобто рівня значущості (α), то похибка визнається систематичною та потребує корекції.

Обчислення індивідуального відхилення для кожної обраної автомагістралі здійснено за формулою:

$$e_i = L_{i\text{онлайн}} - L_{i\text{офіц}} \quad (3.4),$$

де: e_i - відхилення для i -ї ділянки;

$L_{i\text{онлайн}}$ - довжина тієї самої ділянки, виміряна методом на основі даних онлайн-платформ;

$L_{i\text{офіц}}$ - довжина тієї самої ділянки, вказана на порталі Federal Highway Administration.

Середнє зміщення обчислюємо за формулою:

$$\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (3.5),$$

де:

$\bar{e}$ - середня різниця між значеннями довжин горизонтального прокладення на онлайн-платформах і офіційними даними;

n - загальна кількість автомагістралей у вибірці;

$\sum_{i=1}^n e_i$ - сума значень для всіх ділянок, від 1 до n .

Обчислюємо стандартне відхилення за формулою:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2} \quad (3.6),$$

де: s - стандартне відхилення;

n - загальна кількість автомагістралей у вибірці;

e_i - значення окремої похибки;

$\bar{e}$ - середнє зміщення.

Формулюємо нульову гіпотезу $H_0 : \mu = 0$, де H_0 – нульова гіпотеза, а μ – математичне сподівання.

Розраховуємо t -статистику одновибіркового тесту за формулою:

$$t = \frac{\bar{e}}{s/\sqrt{n}} \quad (3.7),$$

де: $\bar{e}$ - середнє зміщення;

s - стандартне відхилення;

n - загальна кількість автомагістралей у вибірці.

Розрахунки представлено в таблиці 3.16. У двох випадках, де розраховано довжину горизонтальних прокладень як суму сегментів за даними GH та розраховано довжину горизонтальних прокладень маршрутів від початкової до кінцевої точок за даними GM умови для нульової гіпотези не справджуються і її відхилено. За обраного рівня значущості $\alpha = 0,05$ (5%) статистичний аналіз засвідчив наявність систематичної похибки під час обчислення горизонтальної довжини маршруту як суми сегментів за даними GH та при розрахунку довжини маршруту одним сегментом (від початкової до кінцевої точки) із його коригуванням за даними GM. За більш суворого критерію $\alpha = 0,01$ (1% рівень імовірності) статистична перевірка не виявила систематичної похибки, так як отримані значення не дають підстав відхилити нульову гіпотезу у всіх випадках.

Таблиця 3.16

Перевірка систематичності похибок при розрахунку довжини горизонтального прокладення для частини основних магістралей США за даними FHWA, OSM, GH та GM

Назва дороги	<i>e_i</i> сегментів, КМ			<i>e_i</i> маршрут, КМ		
	OSM	GH	GM	OSM	GH	GM
1	2	3	4	5	6	7
I-5	5,63	4,16	4,54	2,03	4,03	1,03
I-10*	-5,53	-5,04	-1,99	-38,53	-44,53	-11,81
I-40*	-10,16	-12,96	-10,06	-2,16	-7,46	-9,02
I-75	3,36	-1,21	-3,65	-17,04	-8,04	-55,47
I-90*	-24,55	-27,26	-30,32	-19,55	-26,55	-30,16
I-95	-27,65	-28,95	-17	-35,35	-33,35	-27,30
$\bar{e}$	-9,82	-11,88	-9,75	-18,43	-19,32	-22,12
s	13,90	13,76	12,47	16,59	18,43	20,09
t	-1,73	-2,11	-1,91	-2,72	-2,57	-2,70

Продовження таблиці 3.16

1	2	3	4	5	6	7
$t_{\text{крит}}$ $\alpha=0,05$	2,57					
$ t > t_{\text{крит}}$ $\alpha=0,05$	Ні	Так	Ні	Ні	Ні	Так
$t_{\text{крит}}$ $\alpha=0,01$	4,03					
$ t > t_{\text{крит}}$ $\alpha=0,01$	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні

Всі розраховані значення t від'ємні, що говорить про систематичне заниження розрахованих горизонтальних прокладень за онлайн-платформами відносно офіційних даних. Середня довжина обраних автомагістралей згідно офіційних даних складає 3537,98 км, при розрахунку суми довжин горизонтального прокладення сегментів за OSM середнє зміщення складає (-9,82) км або (-2,77) м/км, за GH середнє зміщення становить (-11,88) км або (-3,36) м/км, за GM середнє зміщення – (-9,75) км або (-2,75) м/км. При розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої із коригуванням маршруту за OSM середнє зміщення складає (-18,43) км або (-5,21) м/км, за GH – (-19,32) км або (-5,45) м/км, за GM – (-22,12) км або (-6,25) м/км.

Аналогічні розрахунки проведено і для території України з метою порівняння з даними, розрахованими для території США. Для аналізу було обрано автомобільні дороги, які входять до офіційного переліку доріг Кабінету Міністрів України, мають зафіксовану довжину і є частиною міжнародних шляхів, що важливі для автоперевезень, та не перетинають зону проведення бойових дій.

У переліку присутня інформація про 28 доріг міжнародного значення, серед яких було обрано 23, що підходять за обраними параметрами, а саме: (рис. 3.15).

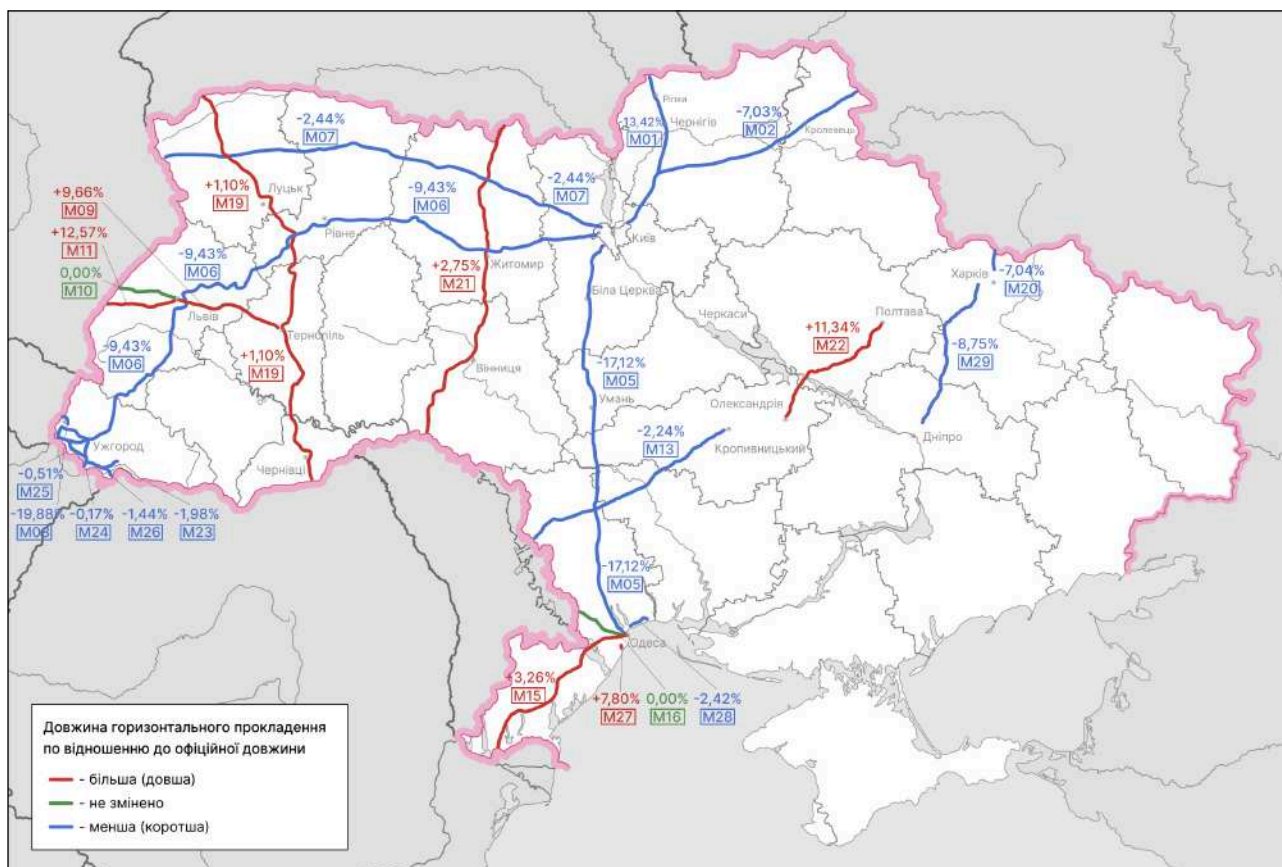


Рисунок 3.15 – Схематичне положення обраних трас на території України із зазначенням відношення їх розрахованої довжини за даними онлайн-платформ до офіційної довжини.

Дорога М-01 починається на східній околиці Києва, проходить через північну частину Придніпровської низовини у Чернігівській області до державного кордону з Республікою Білорусь, офіційна довжина складає 242,9 км (рис. 3.16).

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 210,4 км, що на 32,50 км або 13,42% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 210,34 км, що на 32,56 км або 13,41% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 210,3 км, що на 32,60 км або 13,42% менше за офіційну довжину.

При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за усіма електронними

картами значення складає 210 км, що на 32,90 км або 13,54% менше за офіційну довжину (табл. 3.17).



Рисунок 3.16 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-01, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Таблиця 3.17

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-01 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізу магістралі	Кінець відрізу магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Київ (50.467786, 30.655628)	Бровари (50.496912, 30.833091)	14,7	14,69	14,6
Бровари (50.496912, 30.833091)	Кіпті (51.057593, 31.154119)	69,4	69,40	69,4
Кіпті (51.057593, 31.154119)	Чергінів (51.467101, 31.189378)	51,2	51,22	51,2
Чергінів (51.467101, 31.189378)	Ріпки (51.803826, 31.093331)	43,7	43,68	43,7
Ріпки (51.803826, 31.093331)	Скиток (52.073292, 30.970708)	31,4	31,35	31,4
$\sum L$ сегментів, км		210,4	210,34	210,3
L маршрут, км		210	210	210
L офіц (КМУ), км		242,9		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-32,5	-32,56	-32,60
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-13,38	-13,40	-13,42
L маршрут - L офіц, км		-32,90	-32,90	-32,90
L маршрут / L офіц, %		-13,54	-13,54	-13,54

Дорога М-02 прокладена у межах Придніпровської низовини та Середньоруської височини, середні висоти <150 метрів у межах Чернігівської та Сумської областей, починається у населеному пункті Кіпті Чернігівської

області, закінчується поблизу українського державного кордону з Російською Федерацією, офіційна довжина складає 260,2 км (рис. 3.17).



Рисунок 3.17 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-02, згенерований у ГН на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів однакове за всіма електронними картами і складає 241,9 км, що на 18,30 км або 7,03% менше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за електронними картами ГН та GoogleMaps складає 242 км, що на 18,20 км або 6,99% менше за офіційну довжину, а за OSM складає 243 км, що на 17,20 км або 6,61% менше за офіційну довжину (табл. 3.18).

Таблиця 3.18

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-02 на території України за даними КМУ, OSM, ГН та GM

Початок відрізу магістралі	Кінець відрізу магістралі	L онлайн, км		
		OSM	ГН	GM
1	2	3	4	5
Кіпті (51.065925, 31.156615)	Шевченка (51.194901, 32.2143)	75,6	75,64	75,6
Шевченка (51.194901, 32.2143)	Батурин (51.327144, 32.890905)	49,5	49,54	49,5
Батурин (51.327144, 32.890905)	Кролевець (51.530281, 33.403331)	42,9	42,85	42,9
Кролевець (51.530281, 33.403331)	Глухів (51.719726, 33.880964)	39,2	39,20	39,2

Продовження таблиці 3.18

1	2	3	4	5
Глухів (51.719726, 33.880964)	Бачівськ (51.875190, 34.324300)	34,7	34,68	34,7
$\sum L$ сегментів, КМ		241,9	241,9	241,9
L маршрут, КМ		243	242	242
L офіц (КМУ), КМ		260,2		
$\sum L$ сегментів - L офіц, КМ		-18,30	-18,30	-18,30
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-7,03	-7,03	-7,03
L маршрут - L офіц, КМ		-17,20	-18,20	-18,20
L маршрут / L офіц, %		-6,61	-6,99	-6,99

Дорога М-05 починається у південно-західному передмісті Києва, проходить через центральну частину країни до центра Одеси, основна частина прокладена у межах Придніпровської, Подільської височин та Причорноморської низовини, офіційна довжина складає 560,8 км (рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-05, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 464,7 км, що на 96,10 км або 17,14% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 464,6 км, що на 96,17 км або 17,15% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 464,8 км, що на 96,00 км або 17,12% менше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за усіма електронними картами значення складає 464 км, що на 96,80 км або 17,26% менше за офіційну довжину (табл. 3.19).

Таблиця 3.19

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-05 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Київ (50.370562,30.458902)	Біла Церква (49.840708, 30.158956)	67,7	67,7	67,7
Біла Церква (49.840708, 30.158956)	Жашків (49.24762, 30.086135)	68,1	68,1	68,3
Жашків (49.24762, 30.086135)	Умань (48.722637, 30.253581)	63,4	63,4	63,4
Умань (48.722637, 30.253581)	Луполове (48.144113, 30.302831)	64,9	64,9	64,9
Луполове (48.144113, 30.302831)	Рєвова (47.268725, 30.310306)	99,2	99,1	99,1
Рєвова (47.268725, 30.310306)	Болгарка (46.692471, 30.480596)	66,6	66,6	66,6
Болгарка (46.692471,30.480596)	Одеса (46.469459,30.741005)	34,8	34,8	34,8
$\sum L$ сегментів, км		464,7	464,6	464,8
L маршрут, км		464	464	464
L офіц (КМУ), км		560,8		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-96,10	-96,17	-96,00
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-17,13	-17,15	-17,12
L маршрут - L офіц, км		-96,80	-96,80	-96,80
L маршрут / L офіц, %		-17,26	-17,26	-17,26

Дорога М-06 починається біля західного передмістя Києва, прокладена по рівнинному рельєфу центральної та західної частини країни, а оминаючи Львів прямує через Передкарпаття, Карпати та Закарпатську низовину до державного кордону з Угорщиною у Закарпатській області. Офіційна довжина складає 902,2 км (рис. 3.19).

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 817,4 км, що на 84,80 км або 9,40% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 817,46 км, що на 84,74 км або 9,39% менше за офіційну

довжину. За GM це значення складає 817,1 км, що на 85,10 км або 9,43% менше за офіційну довжину (табл. 3.20).

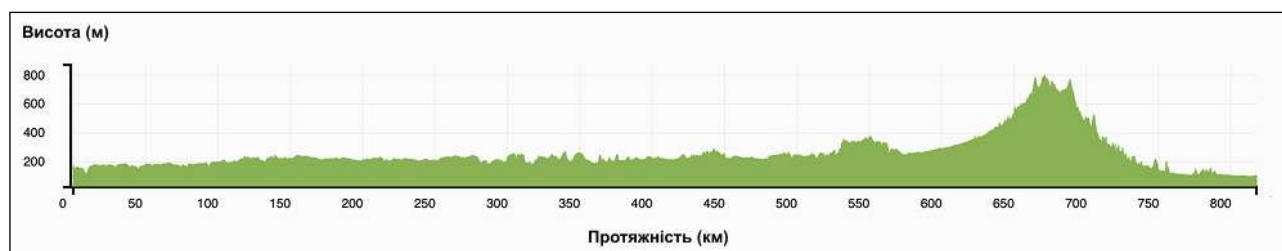


Рисунок 3.19 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-06, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

При проведенні розрахунку довжини горизонтальних прокладень від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за OSM складає 818 км, що на 84,20 км або 9,33% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 816 км, що на 86,20 км або 9,55% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 817 км, що на 85,20 км або 9,44% менше за офіційну довжину (табл 3.20).

Таблиця 3.20

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-06 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
1	2	3	4	5
Київ (50.455500, 30.357930)	Кочерів (50.361946, 29.341678)	73,4	73,37	73,4
Кочерів (50.361946, 29.341678)	Житомир (50.303579, 28.497708)	66,9	66,88	66,9
Житомир (50.303579, 28.497708)	Звягель (50.625971, 27.647493)	72,9	72,86	72,9
Звягель (50.625971, 27.647493)	Рівне (50.585619, 26.144583)	113	113,36	113
Рівне (50.585619, 26.144583)	Дубно (50.427812, 25.739924)	34,4	34,43	34,4
Дубно (50.427812, 25.739924)	Олесько (49.978627, 24.888483)	92,8	92,80	92,8

Продовження таблиці 3.20

1	2	3	4	5
Олесько (49.978627, 24.888483)	Львів (49.768918, 24.014154)	86,1	86,05	86
Львів (49.768918, 24.014154)	Стрий (49.248045, 23.857350)	63	63,02	62,9
Стрий (49.248045, 23.857350)	Коростів (49.006649, 23.439775)	44,5	44,48	44,6
Коростів (49.006649, 23.439775)	Ганковиця (48.635365, 23.048444)	72,6	72,49	72,5
Ганковиця (48.635365, 23.048444)	Мукачево (48.451598, 22.684027)	40,4	40,38	40,4
Мукачево (48.451598, 22.684027)	Ужгород (48.580524, 22.276063)	36,3	36,28	36,3
Ужгород (48.580524, 22.276063)	Чоп (48.414597, 22.171238)	21,1	21,05	21
$\sum L$ сегментів, км		817,4	817,46	817,1
L маршрут, км		818	816	817
L офіц (КМУ), км		902,2		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-84,80	-84,74	-85,10
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-9,39	-9,39	-9,43
L маршрут - L офіц, км		-84,20	-86,20	-85,20
L маршрут / L офіц, %		-9,33	-9,55	-9,44

Дорога М-07 починається у північно-західному передмісті Києва, проходить через Поліську низовину із середнім перепадом висот у межах 200 м, перетинаючи північні області і до державного кордону з Польщею у Волинській області, офіційна довжина складає 499,7 км (рис. 3.20).

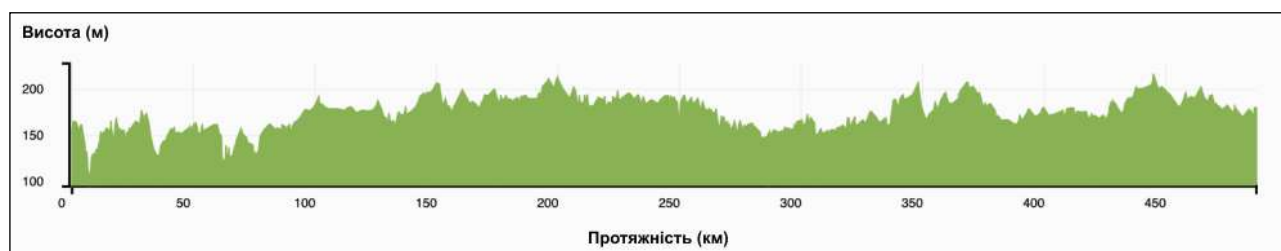


Рисунок 3.20 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-07, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM та GM складає 487,5 км, що на 12,20 км або 2,44% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 487,41 км, що на 12,29 км або 2,46% менше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за OSM складає 489 км, що на 10,70 км або 2,14% менше за офіційну довжину. За GH та GM це значення складає 487 км, що на 12,70 км або 2,54% менше за офіційну довжину (табл. 3.21).

Таблиця 3.21

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-07 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізу магістралі	Кінець відрізу магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Київ (50.515848, 30.361617)	Бородянка (50.64356, 29.913306)	37	36,96	37
Бородянка (50.64356, 29.913306)	Коростень (50.988116, 28.660897)	97,7	97,70	97,7
Коростень (50.988116, 28.660897)	Болярка (51.148618, 27.735433)	70,3	70,27	70,3
Болярка (51.148618, 27.735433)	Старик (51.254544, 27.115061)	45,6	45,62	45,6
Старик (51.254544, 27.115061)	Веретено (51.253332, 26.022713)	80,1	80,06	80,1
Веретено (51.253332, 26.022713)	Озерне (51.249714, 25.198678)	57,8	57,78	57,8
Озерне (51.249714, 25.198678)	Годовичі (51.214384, 24.425467)	55,7	55,71	55,7
Годовичі (51.214384, 24.425467)	Старовойтове (51.189694, 23.813069)	43,3	43,31	43,3
$\sum L$ сегментів, км		487,5	487,41	487,5
L маршрут, км		489	487	487
L офіц (КМУ), км		499,7		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-12,20	-12,29	-12,20
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-2,44	-2,46	-2,44
L маршрут - L офіц, км		-10,70	-12,70	-12,70
L маршрут / L офіц, %		-2,14	-2,54	-2,54

Дорога М-08 - це об'їзний маршрут міста Ужгород, що починається біля державного кордону з Польщею та з'єднується із автодорогою М-06, офіційна довжина складає 17,1 км, рельєф рівнинний, середній перепад висот до 200 м (рис. 3.21).



Рисунок 3.21 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-08, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM та GM складає 13,7 км, що на 3,42 км або 19,88% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 13,68 км, що на 3,42 км або 19,99% менше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за OSM складає 14 км, що на 3,10 км або 18,13% менше за офіційну довжину (табл. 3.22).

Таблиця 3.22

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-08 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізу магістралі	Кінець відрізу магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Ужгород (48.577181, 22.335249)	Ужгород (48.640128, 22.317007)	7,9	7,87	7,9
Ужгород (48.640128, 22.317007)	Ужгород (48.654875, 22.26522)	5,8	5,82	5,8
$\sum L$ сегментів, км		13,7	13,68	13,7
L маршрут, км		14	13,7	13,7
L офіц (КМУ), км		17,1		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-3,40	-3,42	-3,40
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-19,88	-20,00	-19,88
L маршрут - L офіц, км		-3,10	-3,40	-3,40
L маршрут / L офіц, %		-18,13	-19,88	-19,88

За GH та GM це значення складає 13,7 км, що на 3,40 км або 19,88% менше за офіційну довжину.

Дорога М-09 починається на західній околиці міста Тернопіль, проходить через Львів, населений пункт Рава-Руська і закінчується на державному кордоні з Польщею. Проходить через Подільську височину з перепадами висот 350 м, офіційна довжина складає 175 км (рис. 3.22).



Рисунок 3.22 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-09, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 192 км, що на 17 км або 9,71% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 192,02 км, що на 17,02 км або 9,73% більше за офіційну довжину. За GM складає 191,1 км, що на 16,9 км або 9,66% більше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за OSM складає 192,8 км, що на 17,8 км або 10,17% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 192 км, що на 17 км або 9,71% більше за офіційну довжину. За GM це значення складає 193 км, що на 18 км або 10,29% більше за офіційну довжину (табл. 3.23).

Таблиця 3.23

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-09 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
1	2	3	4	5
Тернопіль (49.547711, 25.545195)	Зборів (49.672471, 25.147399)	33,1	33,09	33,1

Продовження таблиці 3.23

1	2	3	4	5
Зборів (49.672471, 25.147399)	Ясенівці (49.804662, 24.842016)	27,9	27,90	27,9
Ясенівці (49.804662, 24.842016)	Куровичі (49.772530, 24.425413)	32,2	32,23	32,2
Куровичі (49.772530, 24.425413)	Львів (49.840169, 24.036309)	30	30,03	30
Львів (49.840169, 24.036309)	Львів (49.845058, 24.029244)	1,1	1,09	1,1
Львів (49.845058, 24.029244)	Львів (49.879430, 24.061970)	5,4	5,35	5,3
Львів (49.879430, 24.061970)	Жовква (50.068847, 23.980778)	24,1	24,10	24,1
Жовква (50.068847, 23.980778)	Рава-Руська (50.274377, 23.588923)	38,2	38,24	38,2
$\sum L$ сегментів, км		192	192,02	191,9
L маршрут, км		192,8	192	193
L офіц (КМУ), км		175		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		17,00	17,02	16,90
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		+9,17	+9,73	+9,66
L маршрут - L офіц, км		17,80	17,00	18,00
L маршрут / L офіц, %		+10,17	+9,71	+10,29

Дорога М-10 починається у Львові, проходить через населений пункт Краковець, територію Розточчя із максимальним перепадом висот близько 150 м і закінчується на державному кордоні з Польщею. Офіційна довжина складає 70,2 км (рис. 3.23).

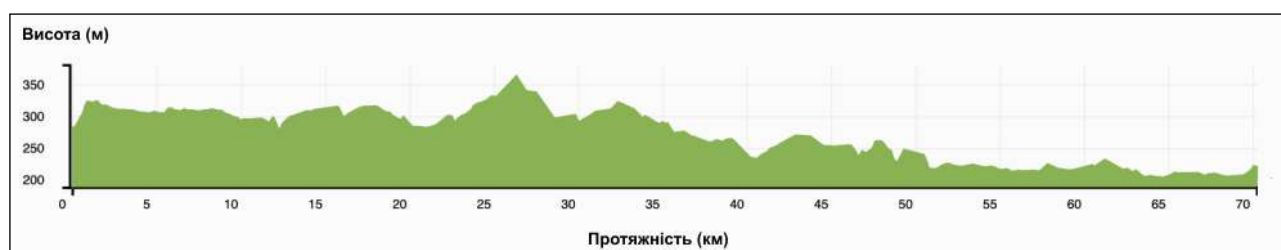


Рисунок 3.23 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-10, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за усіма електронними картами складає 70,2 км, що відповідає офіційній довжині. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за усіма електронними картами також складає 70,2 км, що відповідає офіційній довжині (табл. 3.24).

Таблиця 3.24

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-10 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Львів (49.842972, 24.015843)	Рясне-Руське (49.873466, 23.900451)	9,2	9,2	9,2
Рясне-Руське (49.873466, 23.900451)	Івано-Франкове (49.922448, 23.729825)	14,1	14,1	14,1
Івано-Франкове (49.922448, 23.729825)	Яворів (49.932626, 23.359713)	28	28	28
Яворів (49.932626, 23.359713)	Краковець (49.954944, 23.114277)	18,9	18,9	18,9
$\sum L$ сегментів, км		70,2	70,2	70,2
L маршрут, км		70,2	70,2	70,2
L офіц (КМУ), км		70,2		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		0,00	0,00	0,00
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		0,00	0,00	0,00
L маршрут - L офіц, км		0,00	0,00	0,00
L маршрут / L офіц, %		0,00	0,00	0,00

Дещо більший перепад висот (до 200 м) має дорога М-11, яка також починається у Львові, проходить через населений пункт Шегині і закінчується на державному кордоні з Польщею, офіційна довжина складає 71,6 км (рис. 3.24).

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 81,3 км, що на 9,70 км або 13,55% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 80,89 км, що на 9,29 км або 12,97% більше за офіційну

довжину. За GM складає 80,6 км, що на 9 км або 12,57% більше за офіційну довжину.



Рисунок 3.24 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-11, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

При проведенні розрахунку довжини горизонтальних прокладень від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за OSM складає 81 км, що на 9,40 км або 13,13% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 80,89 км, що на 9,29 км або 12,97% більше за офіційну довжину. За GM це значення складає 80,8 км, що на 9,2 км або 12,85% більше за офіційну довжину (табл. 3.25).

Таблиця 3.25

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-11 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Львів (49.844759, 24.029234)	Городок (49.787165, 23.697114)	25	25,02	24,8
Городок (49.787165, 23.697114)	Городок (49.782853, 23.639993)	4,3	4,24	4,2
Городок (49.782853, 23.639993)	Шегині (49.799712, 22.947802)	52	51,63	51,6
$\sum L$ сегментів, км		81,3	80,89	80,6
L маршрут, км		81	80,89	80,8
L офіц (КМУ), км		71,6		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		9,70	9,29	9,00
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		+13,54	+12,97	+12,57
L маршрут - L офіц, км		9,40	9,29	9,20
L маршрут / L офіц, %		+13,13	+12,97	+12,85

Дорога М-13 починається від Кропивницького, проходить через пересічну місцевість Придніпровської височини по території Кіровоградської області та рівнинній території Миколаївської та Одеської областей із перепадом висот близько 150 м. Закінчується на державному кордоні з Республікою Молдова, офіційна довжина складає 258,6 км (рис. 3.25).



Рисунок 3.25 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-13, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 253 км, що на 5,60 км або 2,17% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 252,79 км, що на 5,81 км або 2,25% менше за офіційну довжину. За GM складає 252,8 км, що на 5,80 км або 2,24% менше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за усіма електронними картами значення складає 253 км, що на 5,60 км або 2,17% менше за офіційну довжину (табл. 3.26).

Таблиця 3.26

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-13 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
1	2	3	4	5
Кропивницький (48.513427, 32.16021)	Радісне (48.326063, 31.731799)	39	38,44	38,4
Радісне (48.326063, 31.731799)	Новогригорівка (48.103623, 31.219567)	47	46,72	46,7

Продовження таблиці 3.26

1	2	3	4	5
Новогригорівка (48.103623, 31.219567)	Генівка (47.935231, 30.92287)	30	30,07	30,1
Генівка (47.935231, 30.92287)	Сергіївка (47.760751, 30.344186)	47	47,42	47,4
Сергіївка (47.760751, 30.344186)	Калістратівка (47.611426, 29.629908)	58	57,77	57,8
Калістратівка (47.611426, 29.629908)	Платонове (47.406719, 29.334677)	32	32,37	32,4
ΣL сегментів, км		253	252,79	252,8
L маршрут, км		253	253	253
L офіц (КМУ), км		258,6		
ΣL сегментів - L офіц, км		-5,60	-5,81	-5,80
ΣL сегментів / L офіц, %		-2,16	-2,25	-2,24
L маршрут - L офіц, км		-5,60	-5,60	-5,60
L маршрут / L офіц, %		-2,17	-2,17	-2,17

Дорога М-15 починається в Одесі, проходить південною частиною області, в основному по слабо розчленованій території Причорноморської низовини з перепадом висот до 100 м. Закінчується поблизу державного кордону з Республікою Молдова, офіційна довжина складає 297,7 км (рис. 3.26).



Рисунок 3.26 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-15, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 307,49 км, що на 9,79 км або 3,29% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 307,41 км, що на 9,71 км або 3,26% більше за офіційну довжину. За GM складає 307,4 км, що на 9,7 км або 3,26% більше за офіційну

довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за OSM та GH складає 306 км, що на 8,30 км або 2,79% більше за офіційну довжину. За GM це значення складає 305 км, що на 7,30 км або 2,45% більше за офіційну довжину (табл. 3.27).

Таблиця 3.27

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-15 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Одеса (46.472553, 30.741049)	Одеса (46.471927, 30.726428)	1,50	1,48	1,5
Одеса (46.471927, 30.726428)	Одеса (46.468194, 30.722741)	0,59	0,59	0,6
Одеса (46.468194, 30.722741)	Одеса (46.460824, 30.706213)	1,70	1,70	1,7
Одеса (46.460824, 30.706213)	Одеса (46.466414, 30.687015)	2,10	2,14	2,1
Одеса (46.466414, 30.687015)	Одеса (46.486134, 30.614039)	6,20	6,15	6,1
Одеса (46.486134, 30.614039)	Маяки (46.412754, 30.263163)	28,80	28,77	28,8
Маяки (46.412754, 30.263163)	Монаши (46.174544, 30.049141)	43,40	43,43	43,4
Монаши (46.174544, 30.049141)	Татарбунари (45.828201, 29.615763)	58,70	58,70	58,7
Татарбунари (45.828201, 29.615763)	Ізмаїл (45.376097, 28.810733)	91,70	91,67	91,7
Ізмаїл (45.376097, 28.810733)	Рені (45.480978, 28.224516)	72,80	72,80	72,8
$\sum L$ сегментів, км		307,49	307,41	307,4
L маршрут, км		306	306	305
L офіц (КМУ), км		297,7		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		9,79	9,71	9,70
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		3,28	3,26	3,26
L маршрут - L офіц, км		8,30	8,30	7,30
L маршрут / L офіц, %		2,79	2,79	2,45

Дорога М-16 починається у західному передмісті Одеси і проходить по рівнинній місцевості Причорноморської височини з перепадами висот до 50 м. Прямує до державного кордону з Республікою Молдова, офіційна довжина складає 58,9 км (рис. 3.27).



Рис. 3.27 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-16, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за усіма електронними картами складає 58,6 км, що на 0,3 км або 0,51% менше за офіційну довжину (табл. 3.28).

Таблиця 3.28

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-16 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Одеса (46.486519, 30.614008)	Василівка (46.605657, 30.300514)	28,7	28,7	28,7
Василівка (46.605657, 30.300514)	Степове (46.706229, 30.076386)	21,4	21,4	21,4
Степове (46.706229, 30.076386)	Кучурган (46.737678, 29.971039)	8,5	8,5	8,5
$\sum L$ сегментів, км		58,6	58,6	58,6
L маршрут, км		59	58,9	58,9
L офіц (КМУ), км		58,9		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-0,30	-0,30	-0,30
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-0,51	-0,51	-0,51
L маршрут - L офіц, км		0,10	0,00	0,00
L маршрут / L офіц, %		0,17	0,00	0,00

При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за OSM складає 59 км, що на 0,1 км або 0,17% більше за офіційну довжину. За GH та GM це значення складає 58,9 км, що відповідає офіційній довжині.

Дорога М-19 починається біля державного кордону з Республікою Білорусь, майже половина її проходить через Поліську низовину із перепадами висот близько 200 м, плавно переходить у Подільську височину, де перепади висот збільшуються до 350-400 м. На своєму шляху перетинає Волинську, Рівненську, Тернопільську, Чернівецьку області і закінчується поблизу державного кордону з Румунією, офіційна довжина складає 534,1 км (рис. 3.28).

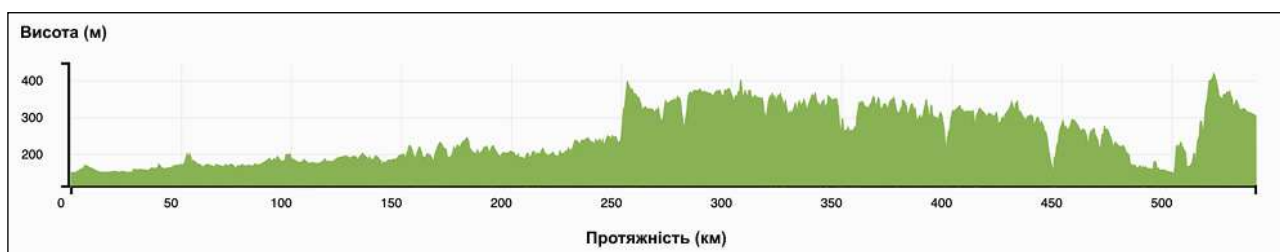


Рисунок 3.28 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-19, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 541,4 км, що на 7,30 км або 1,37% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 540,55 км, що на 6,45 км або 1,21% більше за офіційну довжину. За GM складає 540 км, що на 5,90 км або 1,10% більше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої одним відрізком значення за OSM складає 541,4 км, що на 7,3 км або 1,36% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 540 км, що на 5,90 км або 1,10% більше за офіційну довжину. За GM це значення складає 539 км, що на 4,90 км або 0,92% більше за офіційну довжину (табл. 3.29).

Таблиця 3.29

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-19 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Доманове (51.826588, 24.312668)	Вербка (51.232078, 24.697296)	74	73,81	73,8
Вербка (51.232078, 24.697296)	Луцьк (50.803865, 25.388784)	77	76,76	76,6
Луцьк (50.803865, 25.388784)	Дубно (50.442136, 25.776608)	53	53,71	52,8
Дубно (50.442136, 25.776608)	Дубно (50.406250, 25.760613)	6,2	6,19	6,2
Дубно (50.406250, 25.760613)	Кременець (50.121212, 25.683221)	39	38,03	38,7
Кременець (50.121212, 25.683221)	Кременець (50.089035, 25.706067)	5,2	5,22	5,2
Кременець (50.089035, 25.706067)	Тернопіль (49.528589, 25.604702)	71	71,00	71
Тернопіль (49.528589, 25.604702)	Угринь (48.971171, 25.814828)	74	73,53	73,5
Угринь (48.971171, 25.814828)	Чернівці (48.314830, 25.917758)	91	91,39	91,4
Чернівці (48.314830, 25.917758)	Чернівці (48.282828, 26.037009)	12	11,81	11,8
Чернівці (48.282828, 26.037009)	Тереблече (47.988096, 26.061112)	39	39,09	39
$\sum L$ сегментів, км		541,4	540,55	540
L маршрут, км		541,4	540	539
L офіц (КМУ), км		534,1		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		7,30	6,45	5,90
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		1,36	1,21	1,10
L маршрут - L офіц, км		7,30	5,90	4,90
L маршрут / L офіц, %		1,37	1,10	0,92

Дорога М-20 починається на кільцевій дорозі на північ від Харкова, повністю прокладена по рівнинній території із перепадом висот близько 50 м,

закінчується біля державного кордону з Російською Федерацією, офіційна довжина складає 28,4 км (рис. 3.29).



Рисунок 3.29 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-20, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Через те, що дорога не має значних викривлень геометрії вона була виміряна одним відрізком. За OSM та GM це значення складає 26,4 км, що на 2 км або 7,04% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 26,38 км, що на 2,02 км або 7,11% менше за офіційну довжину (табл. 3.30).

Таблиця 3.30

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-20 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Харків (50.101153, 36.26839)	Гоптівка (50.330301, 36.277156)	26,4	26,38	26,4
$\sum L$ сегментів, км		-	-	-
L маршрут, км		26,4	26,38	26,4
L офіц (КМУ), км		28,4		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-	-	-
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-	-	-
L маршрут - L офіц, км		-2,00	-2,02	-2,00
L маршрут / L офіц, %		0,00	7,11	0,00

Дорога М-21 починається біля державного кордону з Республікою Білорусь, проходить рівнинною територією Поліської низовини на півночі, поступово переходячи у Подільську височину на півдні із перепадом висот близько 100 м. Перетинає Житомирську та Вінницьку області і закінчується

поблизу державного кордону з Республікою Молдова, офіційна довжина складає 410,7 км (рис. 3.30).



Рисунок 3.30 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-21, згенерований у ГН на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 421,68 км, що на 10,98 км або 2,67% більше за офіційну довжину. За ГН це значення складає 421,62 км, що на 10,92 км або 2,66% більше за офіційну довжину. За ГМ складає 422 км, що на 11,30 км або 2,75% більше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової до кінцевої точки одним відрізком значення за OSM отримати було неможливо, через необхідність скорочувати відрізки до довжини обраних сегментів. За ГН це значення складає 420,95 км, що на 10,25 км або 2,5% більше за офіційну довжину. За ГМ це значення складає 422 км, що на 11,30 км або 2,75% більше за офіційну довжину (табл. 3.31).

Таблиця 3.31

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-21 на території України за даними КМУ, OSM, ГН та ГМ

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	ГН	ГМ
1	2	3	4	5
Виступовичі (51.660982, 29.120844)	Виступовичі (51.63832, 29.095125)	3,10	3,10	3,1
Виступовичі (51.63832, 29.095125)	Овруч (51.334545, 28.805891)	40,85	40,85	40,85
Овруч (51.334545, 28.805891)	Коростень (50.988817, 28.660291)	43,10	43,13	43,1
Коростень (50.988817, 28.660291)	Житомир (50.256782, 28.663935)	90,40	90,35	90,2

Продовження таблиці 3.31

1	2	3	4	5
Житомир (50.256782, 28.663935)	Житомир (50.254141, 28.659819)	0,63	0,63	0,65
Житомир (50.254141, 28.659819)	Житомир (50.242822, 28.687362)	2,40	2,44	2,4
Житомир (50.242822, 28.687362)	Бердичів (49.886597, 28.657046)	41,70	41,70	42,2
Бердичів (49.886597, 28.657046)	Вінниця (49.285058, 28.472732)	76,30	76,32	76,3
Вінниця (49.285058, 28.472732)	Жмеринка (49.041831, 28.041242)	45,90	45,86	45,9
Жмеринка (49.041831, 28.041242)	Могилів-Подільський (48.460078, 27.766783)	74,70	74,67	74,7
Могилів-Подільський (48.460078, 27.766783)	Могилів-Подільський (48.444109, 27.790420)	2,60	2,57	2,6
$\sum L$ сегментів, км		421,68	421,62	422
L маршрут, км		-	420,95	422
L офіц (КМУ), км		410,7		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		10,98	10,92	11,30
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		2,67	2,66	2,75
L маршрут - L офіц, км		-	10,25	11,30
L маршрут / L офіц, %		-	2,50	2,75

Дорога М-22 починається в Полтаві, перетинає долину річки Дніпро, проходячи через Придніпровську низовину із перепадом висот до 150 м, закінчується поблизу міста Олександрія, офіційна довжина складає 148,2 км (рис. 3.31).



Рисунок 3.31 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-22, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM та GH складає 165,1 км, що на 16,9 км або 11,40% більше за офіційну довжину. За GM складає 165 км, що на 16,80 км або 11,34% більше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової до кінцевої точки одним відрізком значення за OSM та GM складає 165 км, що на 16,80 км або 11,34% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 166 км, що на 17,80 км або 12,01% більше за офіційну довжину (табл. 3.32).

Таблиця 3.32

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-22 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Полтава (49.560093, 34.524616)	Лелюхівка (49.353658, 34.297316)	30,8	30,8	30,8
Лелюхівка (49.353658, 34.297316)	Андрийки (49.199340, 33.927869)	34	34,0	34
Андрийки (49.199340, 33.927869)	Кременчук (49.105922, 33.435531)	40,5	40,5	40,4
Кременчук (49.105922, 33.435531)	Олександрія (48.691858, 33.111374)	59,8	59,8	59,8
$\sum L$ сегментів, км		165,1	165,1	165
L маршрут, км		165	166	165
L офіц (КМУ), км		148,2		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		16,90	16,90	16,80
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		11,4	11,40	11,34
L маршрут - L офіц, км		16,80	17,80	16,80
L маршрут / L офіц, %		11,34	12,01	11,34

Дорога М-23 проходить рівнинною територією Закарпатської низовини із перепадами висот до 100 м. Починається у населеному пункті Берегове і закінчується у населеному пункті Велика Копаня Закарпатської області, офіційна довжина складає 50 км (рис. 3.32).



Рисунок 3.32 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-23, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 49 км, що на 1 км або 2% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 49,5 км, що на 0,5 км або 1% менше за офіційну довжину. За GM складає 49,1 км, що на 0,9 км або 1,8% менше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової до кінцевої точки одним відрізком значення за OSM та GH збігається зі значення суми відрізків. За GM це значення складає 49,4 км, що на 0,6 км або 1,2% менше за офіційну довжину (табл. 3.33).

Таблиця 3.33

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-23 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізу магістралі	Кінець відрізу магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Берегове (48.206122, 22.645422)	Вилок (48.110741, 22.836892)	21	21,20	21,2
Вилок (48.110741, 22.836892)	Велика Копаня (48.195189, 23.14463)	28	28,30	27,9
$\sum L$ сегментів, км		49	49,5	49,1
L маршрут, км		49	49,5	49,4
L офіц (КМУ), км		50		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-1,00	-0,50	-0,90
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-2,00	-1,00	-1,00
L маршрут - L офіц, км		-1,00	-0,50	-0,60
L маршрут / L офіц, %		-2,00	-1,00	-1,80

Дорога М-24 знаходиться у Закарпатській області, починається у населеному пункті Велика Добронь, проходить через Мукачево, Берегове і закінчується поблизу державного кордону із Угорщиною, рельєф рівнинний, перепад висоти до 20 м, офіційна довжина складає 60,5 км (рис. 3.33).



Рисунок 3.33 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-24, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 60,5 км, що збігається з офіційною довжиною. За GH це значення складає 60,45 км, що на 0,05 км або 0,08% менше за офіційну довжину. За GM складає 60,4 км, що на 0,1 км або 0,16% менше за офіційну довжину (табл. 3.34).

Таблиця 3.34

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-24 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, КМ		
		OSM	GH	GM
Велика Добронь (48.422132, 22.391779)	Мукачево (48.435998, 22.689455)	24,6	24,57	24,6
Мукачево (48.435998, 22.689455)	Астей (48.165592, 22.574168)	35,9	35,88	35,8
$\sum L$ сегментів, КМ		60,5	60,45	60,4
L маршрут, КМ		60,3	61	60,3
L офіц (КМУ), КМ		60,5		
$\sum L$ сегментів - L офіц, КМ		0,00	-0,05	-0,10
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		0,00	-0,08	-0,17
L маршрут - L офіц, КМ		-0,20	0,50	-0,20
L маршрут / L офіц, %		-0,33	0,83	-0,33

При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової до кінцевої точки одним відрізком значення за OSM складає 60,3 км, що на 0,2 км або 0,33% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 61 км, що на 0,5 км або 0,83% більше за офіційну довжину. За GM це значення складає 60,3 км, що на 0,2 км або 0,32% менше за офіційну довжину.

Дорога М-25 починається біля державного кордону із Словацькою Республікою, проходить через населені пункти Закарпатської області Чоп, та Велика Добронь і закінчується у населеному пункті Яноші. Рельєф рівнинний, декілька ділянок мають перепад висоти більше 20 м. Офіційна довжина складає 55,1 км (рис. 3.34).



Рисунок 3.34 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-25, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 58,8 км, що на 3,7 км або 6,72% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 58,79 км, що на 3,69 км або 6,7% більше за офіційну довжину. За GM складає 58,6 км, що на 3,5 км або 6,35% більше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової до кінцевої точки одним відрізком значення за OSM складає 56,5 км, що на 1,4 км або 2,54% більше за офіційну довжину. За GH це значення складає 56,9 км, що на 1,8 км або 3,27% більше за офіційну довжину. За GM це значення складає 56,6 км, що на 1,5 км або 2,72% більше за офіційну довжину (рис. 3.35).

Таблиця 3.35

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-25 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Соломонове (48.435622, 22.139438)	Соломонове (48.440198, 22.186342)	3,5	3,52	3,5
Соломонове (48.440198, 22.186342)	Велика Добронь (48.421982, 22.391614)	20,1	20,13	19,9
Велика Добронь (48.421982, 22.391614)	Заспонець (48.273546, 22.462302)	21,6	21,57	21,6
Заспонець (48.273546, 22.462302)	Яноши (48.252762, 22.626302)	13,6	13,58	13,6
$\sum L$ сегментів, км		58,8	58,79	58,6
L маршрут, км		56,5	56,9	56,6
L офіц (КМУ), км		55,1		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		3,70	3,69	3,50
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		6,72	6,70	6,35
L маршрут - L офіц, км		1,40	1,80	1,50
L маршрут / L офіц, %		2,54	3,27	2,72

Дорога М-26 починається в населеному пункті Вилки Закарпатської області і закінчується неподалік від населеного пункту Неветленфолу Закарпатської області поблизу державного кордону з Румунією, рельєф рівнинний із перепадами висот до 10 метрів, офіційна довжина складає 20,6 км (рис. 3.35).



Рисунок 3.35 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-26, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 20 км, що на 0,6 км або 2,9% менше за офіційну довжину. За GH та GM це значення складає 20,5 км, що на 0,1 км або 0,5% менше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової до кінцевої точки одним відрізком значення за OSM це значення складає 21 км, що на 0,4 км або 1,9% більше за офіційну довжину. За GH та GM це значення складає 20,5 км, що на 0,1 км або 0,5% менше за офіційну довжину (табл. 3.36).

Таблиця 3.36

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-26 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Вилок (48.110786, 22.836691)	Пийтерфолво (48.065503, 22.931419)	10,00	10,20	10,20
Пийтерфолво (48.065503, 22.931419)	Неветленфолу (47.995749, 23.001533)	10,00	10,30	10,30
$\sum L$ сегментів, км		20,00	20,50	20,50
L маршрут, км		21	20,50	20,50
L офіц (КМУ), км		20,6		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-0,60	-0,10	-0,10
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-2,91	-0,49	-0,49
L маршрут - L офіц, км		0,40	-0,10	-0,10
L маршрут / L офіц, %		1,94	-0,49	-0,49

Дорога М-27 починається в Одесі і закінчується у Чорноморську, офіційна довжина складає 14,1 км, на всій ділянці рівний рельєф із перепадами висоти до 30 метрів (рис. 3.36).

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за усіма електронними картами складає 15,3 км, що на 1,2 км або 8,51% більше за офіційну довжину. При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової до кінцевої точки одним відрізком значення було неможливо отримати через перепону у вигляді залізної дороги (табл. 3.37).



Рисунок 3.36 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-27, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Таблиця 3.37

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-27 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Одеса (46.397058, 30.707488)	Бурлача Балка (46.35167, 30.664762)	8,00	8,00	8,00
Бурлача Балка (46.35167, 30.664762)	Олександрівка (46.322562, 30.624784)	6,00	6,00	6,00
Олександрівка (46.322562, 30.624784)	Чорноморськ (46.319199, 30.639824)	1,30	1,30	1,30
$\sum L$ сегментів, км		15,3	15,3	15,3
L маршрут, км		-	-	-
L офіц (КМУ), км		14,1		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		1,20	1,20	1,20
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		8,51	8,51	8,51
L маршрут - L офіц, км		-	-	-
L маршрут / L офіц, %		-	-	-

Дорога М-28, як і М-27, прокладена через рівнинний рельєф із перепадами висоти до 40 метрів, починається у північно-східній частині Одеси, проходить через населений пункт Южне і закінчується приєднуючись до автодороги М-14, офіційна довжина складає 37,2 км (рис. 3.37).

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM складає 37 км, що на 0,2 км або 0,54% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 36,3 км, що на 0,9 км або 2,42% менше за офіційну довжину.

За ГМ складає 36,4 км, що на 0,8 км або 2,15% менше за офіційну довжину (табл. 3.38).



Рисунок 3.37 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-28, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

При проведенні розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової до кінцевої точки одним відрізком значення за всіма онлайн-платформами збігаються зі значення суми відрізків.

Таблиця 3.38

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-28 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізу магістралі	Кінець відрізу магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Одеса (46.565944, 30.78874)	Григорівка (46.602688, 31.000649)	18,00	17,50	17,50
Григорівка (46.602688, 31.000649)	Сичавка (46.650106, 31.131955)	19,00	18,80	18,90
$\sum L$ сегментів, км		37	36,3	36,4
L маршрут, км		37	36,3	36,4
L офіц (КМУ), км		37,2		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-0,20	-0,90	-0,80
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-0,54	-2,42	-2,15
L маршрут - L офіц, км		-0,20	-0,90	-0,80
L маршрут / L офіц, %		-0,54	-2,42	-2,15

Дорога М-29 починається як відгалуження автодороги М-03 поблизу межі між територіями Люботинської та Пісочинської громад Харківської області, проходить через Харківську та Дніпропетровську області і закінчується

з'єднуючись із автодорогою М-30, офіційна довжина складає 198,9 км. Дорогу прокладено по рівнинному рельєфу, який перетинають ярі та балки, перепад висот до 150 метрів (рис. 3.38).

Значення суми довжин горизонтальних прокладень сегментів за OSM та GM складає 181,5 км, що на 17,4 км або 8,75% менше за офіційну довжину. За GH це значення складає 181,52 км, що на 17,38 км або 8,74% менше за офіційну довжину (табл. 3.39).



Рисунок 3.38 – Профіль рельєфу території, якою прокладено автодорогу М-29, згенерований у GH на основі DEM SRTM1.

Таблиця 3.39

Порівняння довжини горизонтального прокладення автодороги М-29 на території України за даними КМУ, OSM, GH та GM

Початок відрізка магістралі	Кінець відрізка магістралі	L онлайн, км		
		OSM	GH	GM
Пісочин (49.972282, 35.991246)	Нова Водолага (49.751505, 35.843486)	29,2	29,23	29,2
Нова Водолага (49.751505, 35.843486)	Високе (49.499361, 35.488315)	41,9	41,91	41,9
Високе (49.499361, 35.488315)	Вишневе (49.082478, 35.458094)	48	47,99	48
Вишневе (49.082478, 35.458094)	Дніпро (48.587774, 35.14746)	62,4	62,40	62,4
$\sum L$ сегментів, км		181,5	181,52	181,5
L маршрут, км		182	182	182,2
L офіц (КМУ), км		198,9		
$\sum L$ сегментів - L офіц, км		-17,40	-17,38	-17,40
$\sum L$ сегментів / L офіц, %		-8,75	-8,74	-8,75
L маршрут - L офіц, км		-16,90	-16,90	-16,70
L маршрут / L офіц, %		-8,50	-8,50	-8,40

При проведенні розрахунку довжини горизонтальних прокладень від початкової до кінцевої точки одним відрізком значення за OSM та GH це значення складає 182 км, що на 16,9 км або 8,5% менше за офіційну довжину. За GM це значення складає 182,2 км, що на 16,7 км або 8,4% менше за офіційну довжину.

З метою визначення природи похибок та перевірки наявності їх систематичного характеру здійснено розрахунки за формулами 1.1–1.5, результати яких подано в таблиці 3.40. За умови вибору рівня значущості 0,05 (або 5% імовірності) та 0,01 (або 1% імовірності) немає підстав відкидати нульову гіпотезу, отже ознаки систематичності появи похибок відсутні.

Таблиця 3.40

Порівняння протяжності міжнародних магістралей в межах України за даними переліку автомобільних доріг, OSM, GH та GM

Назва дороги	<i>ℓ_i сегментів, КМ</i>			<i>ℓ_i маршрут, КМ</i>		
	OSM	GH	GM	OSM	GH	GM
1	2	3	4	5	6	7
М-01	-32,50	-32,56	-32,6	-32,90	-32,90	-32,90
М-02	-18,30	-18,30	-18,3	-17,20	-18,20	-18,20
М-05	-96,10	-96,20	-96	-96,80	-96,80	-96,80
М-06	-84,80	-84,74	-85,1	-84,20	-86,20	-85,20
М-07	-12,20	-12,29	-12,2	-10,70	-12,70	-12,70
М-08	-3,40	-3,42	-3,4	-3,10	-3,40	-3,40
М-09	17,00	17,02	16,9	17,80	17,00	18,00
М-10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
М-11	9,70	9,29	9	9,40	9,29	9,20
М-13	-5,60	-5,81	-5,8	-5,60	-5,60	-5,60
М-15	9,79	9,71	9,7	8,30	8,30	7,30
М-16	-0,30	-0,30	-0,30	0,10	0,00	0,00
М-19	7,30	6,45	5,9	7,30	5,90	4,90
М-20	-	-	-	0,00	-2,02	0,00

Продовження таблиці 3.40

1	2	3	4	5	6	7
M-21	10,98	10,92	11,3	-	10,25	11,30
M-22	16,90	16,90	16,8	16,80	17,80	16,80
M-23	-1,00	-0,50	-0,9	-1,00	-0,50	-0,60
M-24	0,00	-0,05	-0,1	-0,20	0,50	-0,20
M-25	3,70	3,69	3,5	1,40	1,80	1,50
M-26	-0,60	-0,10	-0,1	0,40	-0,10	-0,10
M-27	1,20	1,20	1,2	-	-	-
M-28	-0,20	-0,90	-0,8	-0,20	-0,90	-0,80
M-29	-17,40	-17,38	-17,4	-16,90	-16,90	-16,70
$\bar{e}$	-8,90	-8,97	-9,03	-9,87	-9,34	-9,28
s	28,89	28,86	28,85	29,19	29,03	28,89
t	-0,75	-0,76	-0,77	-0,83	-0,79	-0,79
$t_{\text{крит}}$ $\alpha=0,05$	2,57					
$ t > t_{\text{крит}}$ $\alpha=0,05$	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні
$t_{\text{крит}}$ $\alpha=0,01$	4,03					
$ t > t_{\text{крит}}$ $\alpha=0,01$	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні	Ні

Серед проаналізованих доріг в Україні кожна усереднена довжина горизонтального прокладення, розрахована за даними онлайн-платформ та офіційна довжина співпали тільки для однієї дороги М-10 (Львів-Краковець). До групи доріг із розбіжностями до 1% належать М-16, М-24, М-26. Розбіжності до 5% зафіксовано на дорогах М-07, М-13, М-15, М-19, М-20, М-21, М-23, М-28. Розбіжності від 5% до 10% зафіксовано на дорогах М-02, М-06, М-09, М-25, М-27, М-29. Розбіжності від 10% до 15% зафіксовано на дорогах М-01, М-11, М-22. Розбіжності більше 15% зафіксовано на дорогах М-05 та М-08.

Всі розраховані значення t від'ємні, що говорить про систематичне заниження розрахованих горизонтальних прокладень за онлайн-платформами відносно офіційних даних. Середня довжина обраних автомагістралей згідно офіційних даних складає 216,20 км, при розрахунку суми довжин горизонтального прокладення сегментів за OSM середнє зміщення складає (-8,90) км або (-41,17) м/км, за GH – (-8,97) км або (-41,49) м/км, за GM – (-9,03) км або (-42,93) м/км. При розрахунку довжини горизонтального прокладення від початкової точки до кінцевої із коригуванням маршруту за OSM середнє зміщення становить (-9,87) км або (-41,49) м/км, за GH – (-9,34) км або (-43,17) м/км, за GM – (-9,28) км або (-43,93) м/км.

3.4 Визначення перспектив застосування високоточних картографічних моделей для різних груп користувачів

Ефект від використання точних карт із урахуванням природних факторів та достовірної офіційної статистичної інформації про дороги буде відрізнятись в залежності від запиту користувачів. Потенційних користувачів можна поділити на чотири групи: 1) приватні особи, 2) бізнес та комерція (зокрема у сфері логістики та перевезень), 3) військові, 4) служби швидкого реагування. Фактично кожна із сторін аналізу показує соціальний, економічний та екологічний аспекти. Більш повно економічний аспект викладено в роботі [13].

На рівні *приватних осіб* використання таких карт дозволяє краще планувати маршрут, уникати потенційно небезпечних ділянок, оптимізувати витрати на утримання автомобіля, зменшити стрес при кращій інформованості про природне середовище тощо.

Високоточні карти підсилюють сильні сторони водіїв-аматорів і туристів – краща безпека маршруту, економія пального, зниження стресу. Слабкими сторонами залишаються обмежені цифрові навички та залежність від інтернету. Можливістю є підвищення культури відповідального водіння та використання еко-маршрутів, тоді як загроза проявляється у зростаючій довірі до інтернету речей в цілому та навігації зокрема, що може приглушити власне критичне мислення та у вузькому розумінні навички орієнтування (табл. 3.41).

Таблиця 3.41

SWOT-аналіз ефекту при використанні точних карт для приватних осіб

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Підвищення безпеки на дорогах 2. Можливості точнішого формування безбар'єрних маршрутів для людей з обмеженими можливостями 3. Зниження стресу через більшу прогнозованість проходження маршруту 4. Підвищення точності прибуття у разі негоди 5. Оптимізація бюджету на пальне 6. Зменшення непрогнозованих витрат через низьку якість дорожнього покриття 7. Оптимізація фінансів та часу для подорожей 8. Підвищена залишкова вартість автомобіля через зменшення зносу 9. Більш точний облік викидів CO₂ 10. Зниження шуму у житлових районах 11. Зменшення зносу шин і розповсюдження мікропластику 12. Оптимізація витрат пального	1. Необхідність володіння базовою цифровою грамотністю 2. Зниження уважності через навігацію в реальному часі 3. Недовіра даним з боку старшого покоління 4. Перевитрати пального при формуванні об'їзних маршрутів через поганий стан доріг на основних 5. Додаткові витрати на придбання ліцензій або спеціалізованих додатків 6. Збільшення обсягу інтернет-трафіку 7. Додаткові витрати на прилади, що підтримують актуальні оновлення 8. Перевитрати пального при використанні об'їзних маршрутів 9. Вибір мальовничих маршрутів провокує сильнішу сегментованість дикої природи 10. Збільшення потоку туристів через поїздки до «нових» місць
Можливості	Загрози
1. Групові проекти волонтерського оновлення карт 2. Навчання дітей безпеці на дорозі 3. Додаткові контакти для групових мандрівок 4. Оптимізація бюджету при групових поїздках 5. Запобігання штрафам за порушення ПДР 6. Економія на оплатах страхових полісів через безпечне водіння	1. Втрата орієнтації без GPS при глушінні сигналу 2. Збільшення ризику кібер-залежності при постійному моніторингу карти 3. Хибне почуття безпеки 4. Потенційний витік історії переміщень 5. Ризик оплат підписок на неякісні продукти 6. Додаткові витрати на придбання ліцензій або спеціалізованих додатків 7. Несподівані платні оновлення ПЗ 8. Зростання витрат через несвоєчасне оновлення карт 9. Погіршення заповідних екосистем через хибні маршрути 10. Перевантаження місцевих доріг і деградація природних коридорів 11. Частіші пожежі через низьку екологічну свідомість

У підсумку – приватні користувачі виграють найбільше при щоденному використанні, якщо паралельно розвиватимуть цифрову грамотність і критичне мислення.

Бізнес-структури та комерційні підприємства в широкому розумінні, а особливо сфера логістики та комерційних перевезень, при використанні таких карт можуть отримувати стратегічні переваги, що вплинуть заощадження через

більш оптимізовану логістику та лояльність співробітників за рахунок підвищення їх обізнаності у потенційних ризиках, пов'язаних із використовуваними маршрутами. Детально розглянуто у таблиці 3.42.

Таблиця 3.42

SWOT-аналіз ефекту при використанні точних карт для бізнесу та комерції

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Підвищення довіри до компанії через низький показник участі у ДТП водіїв у штаті 2. Полегшений рекрутинг та утримання персоналу 3. Зниження порогу «вигорання» на роботі через додаткове піклування 4. Покращення репутації компанії на ринку через відповідність сучасним трендам 5. Оптимізація бюджету на пальне, амотризацію, страхові поліси 6. Зменшення непрогнозованих витрат затримки та несвоєчасні доставки товару 7. Скорочення «порожнього пробігу» 8. Підвищена залишкова вартість автопарку через зменшення зносу 9. Зменшення викидів CO₂ шляхом кращого прогнозування обстановки на дорозі 10. Зниження шуму у житлових районах через використання альтернативних маршрутів 11. Зменшення зносу шин і розповсюдження мікропластику	1. Опір змінам звичних маршрутів 2. Збільшення навантаження через підвищення уважності 3. Необхідність проведення додаткового навчання для старшого покоління 4. Потенційне збільшення елементів контролю та підвищення напруження в колективі 5. Витрати на інтеграцію у внутрішні системи управління 6. Додаткові витрати на придбання ліцензій або спеціалізованих додатків 7. Збільшення витрат на збереження резервних копій 8. Додаткові витрати на карти інших країн та регіонів 9. Ризик перевантаження екологічно чутливих регіонів 10. Збільшення викидів CO₂ у разі неточних або неактуальних даних 11. Збільшення кількості сміття на регіональних та локальних дорогах
Можливості	Загрози
1. Програми лояльності для водіїв за безпечне керування в дорозі 2. Система знижок у страхових компаній 3. Аналітика для динамічного ціноутворення 4. Оптимізація простору на складах на основі даних про кліматичні ризики 5. Підвищення актуальності мультимодальних перевезень 6. Використання екологічних двигунів (газ/водень) на ділянках зі складним рельєфом 7. Створення окремих доріг тільки для цілей вантажного транзиту 8. Збільшення інвестицій у електричні транспортні засоби	1. Залежність стабільності ланцюгів постачання від кібератак 2. Репутаційні збитки через витік маршрутів 3. Збільшення кількості судових позовів у випадках ДТП через неактуальні дані 4. Непрогнозованість цін на ліцензії 5. Додаткові витрати при збільшенні частоти оновлення даних через прискорення кліматичних змін 6. Ризик регуляторних штрафів за неправомірне використання даних 7. Підвищення впливу людини на природу при створенні логістичних вузлів у зонах альтернативних маршрутів 8. Збільшення викидів при ігноруванні рекомендацій на маршруті 9. Підвищена інтенсивність ерозії вздовж нових об'їзних маршрутів

Точні карти можуть слугувати стратегічним активом через операційну ефективність, оптимізований контроль витрат. Слабкість виражається у

необхідності інвестувати у інтеграцію технологій та найм додаткового персоналу. Основною загрозою є втрата конкурентних переваг при затягуванні впровадження та використання точних карт.

Використання точних карт для *військових* цілей може мати на меті отримання актуальних оперативних даних про локальні просторово-часові особливості. Більше точне моделювання часових і просторових природних умов розширюють можливості військ у плануванні операцій і логістики. Слабкість використання цих моделей полягає у критичній залежності від захищених каналів і кібербезпеки. Створюється можливість повної інтеграції великого спектру просторових даних, що збільшує інформованість, але одночасно зберігається загроза витоків / втрати інформації. Досягнення найкращого ефекту можливе за умови суворого контролю доступу і швидкого постійного оновлення даних. Детальніше розглянуто у таблиці 3.43.

Таблиця 3.43

SWOT-аналіз ефекту при використанні точних карт для військових

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Точні маршрути евакуації цивільних 2. Зменшення втрат особового складу 3. Покращене планування медевакуації 4. Вищий моральний дух через кращу прогнозованість 5. Оптимізація бюджету 6. Менше втрат техніки через природні умови 7. Оптимізоване використання інженерної техніки 8. Врахування екологічно чутливих зон при плануванні операцій 9. Планування фортифікацій з мінімізацією шкоди	1. Необхідність секретних каналів зв'язку 2. Підвищене психологічне навантаження через залежність від цифрових карт 3. Необхідність наявності відповідних приладів 4. Ризик деморалізації при неактуальних даних 5. Відсутність можливості повноцінного оновлення даних на окупованих ворогом територіях 6. Висока ціна регулярної актуалізації БПЛА-знімків 7. Дублювання карт під різні стандарти 8. Збільшення витрат кіберзахист 9. Додаткові витрати на логістику серверів поблизу фронту 10. Аварійне руйнування природних бар'єрів при об'їздах 11. Підвищення інтенсивності деградації природного середовища 12. Збільшення кількості сміття на регіональних та локальних дорогах

Продовження таблиці 3.43

Можливості	Загрози
1. Покращена автоматизація розмінування 2. Психологічні операції із навмисної дезінформації ворога 3. Симуляція тренувань у віртуальній реальності чи в умовах доповненої реальності 4. Співфінансування даних із союзниками 5. Подальше використання карт у період відбудови 6. Конверсія військових карт у цивільні після війни 7. Ефективний контроль ланцюгів постачання 8. Відновлення лісів за картами деградації 9. Розмінування з ШП-аналізом рельєфу	1. Потрапляння карт до ворога 2. Швидка зміна рельєфу у зоні активного ведення бойових дій 3. Пошкодження критичних серверів через обстріли 4. Знижена актуальність даних на ділянках із радіаційним чи хімічним ураженням через обмежений доступ

Для *служб швидкого реагування* високоточні цифрові карти, що поєднують деталі рельєфу, дорожньої інфраструктури та оперативні погодні шари, перетворюються на критично важливий інструмент. Він дає можливість моделювати найкоротші, але водночас безпечні маршрути, враховуючи реальну пропускну здатність доріг, вагові обмеження мостів і ризики підтоплень чи зсувів.

Таблиця 3.44

SWOT-аналіз ефекту при використанні точних карт
для служб швидкого реагування

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Зменшення часу на прибуття до місця призначення 2. Краща координація між підрозділами через використання єдиної карти 3. Підвищення рівня довіри з боку населення 4. Оптимізація витрат на паливе та амортизацію 5. Обґрунтування інвестицій у проміжні станції	1. Залежність від якості зв'язку в зоні надзвичайної ситуації 2. Підвищення навантаження на диспетчерів 3. Підвищення ризику прийняття рішень тільки на основі карт 4. Додаткові витрати на придбання ліцензій або спеціалізованих додатків 5. Збільшення обсягу інтернет-трафіку 6. Додаткові витрати на прилади, що підтримують актуальні оновлення 7. Витрати на IT-спеціалістів

Можливості	Загрози
1. Більш інформативна звітність перед громадою 2. Симуляція тренувань у віртуальній реальності чи в умовах доповненої реальності 3. Співфінансування даних колективно всіма службами швидкого реагування 4. Додаткове фінансування із програм розвитку смарт-міст 5. Розгортання станцій оперативного пожежогасіння дронами 6. Відстеження переміщення диких тварин	1. Перевантаження серверів у моменти одночасного реагування всіх служб 2. Саботаж із внесенням спотвореної інформації 3. Раптове зменшення бюджету у періоди фінансових криз 4. Дублювання витрат між відомствами 5. Знищення орієнтирів під час надзвичайних ситуацій, особливо в природному середовищі під час пожеж чи повеней 6. Швидка втрата актуальності карти в зонах обмеженої доступності під час снігопадів, повеней чи обвалів

Завдяки цьому рятувальники, медики й пожежні бригади можуть не лише скорочувати час прибуття на місце події, а й превентивно розміщувати допоміжні ресурси поблизу зон підвищеної небезпеки.

Для громадянської спільноти – від науковців до активістів – такий самий масив даних відкриває доступ до об'єктивної інформації про природні небезпеки й екологічно чутливі території, стимулює волонтерські ініціативи та розвиває культуру відповідального користування простором. У результаті точні карти стають спільною платформою, що синхронізує державні сервіси, екстрені служби й громадян у єдиному інформаційному полі, де прозорість, ефективність і безпека підсилюють одна одну та забезпечують узгоджену й стійку взаємодію.

3.5 Рекомендації з підвищення точності картографічної візуалізації автомобільних шляхів

На основі проведеної роботи можна викласти наступні **рекомендації**:

1. Офіційно затвердити мінімально допустиму щільність лазерного сканування: не менше 0,5 точок/м² у гірських районах і 0,02 точок/м² на рівнинах. Така норма є базовою передумовою для побудови високоточної

цифрової моделі місцевості, що лягає в основу алгоритму підвищення точності картографічної візуалізації.

2. Регламентувати періодичність оновлення національної цифрової моделі поверхні: у зонах складного рельєфу – не рідше одного разу на три роки, на рівнинних територіях – раз на п'ять років, із обов'язковим урахуванням придорожніх природних факторів. Регулярне оновлення забезпечить актуальність даних для всіх груп користувачів, визначених у SWOT-аналізі.

3. Установити вимогу зберігати вихідні координати в нативних системах із однозначним документуванням параметрів трансформації у метаданих згідно з ISO 19115-1 / ДСТУ ISO 19115-1:2021. Такий підхід мінімізує трансформаційні похибки й полегшує інтеграцію даних у багатоплатформні навігаційні сервіси.

4. Створити на базі Національного геопорталу єдиний хмарний сервіс даних лазерного сканування, який акумулюватиме та зберігатиме щільні хмари точок для подальших наукових досліджень, моніторингу просторово-часової динаміки та формування «цифрових відбитків» стану геосистем і антропогенних ландшафтів.

5. Розробити інтегровані модулі для онлайн-картографічних платформ, що автоматично враховуватимуть природні чинники (рельєф, гідрографію, кліматичну інформацію, інформацію про погоду, рослинність) та оперативно попереджатимуть водіїв про потенційні ризики на маршруті; це підвищить цінність високоточних моделей для масового користувача й професійних служб.

6. Переглянути статус і освітню траєкторію спеціальності «картографія», розробивши національну стратегію розвитку всієї галузі з метою відновлення професійної підготовки, підвищення картографічної грамотності населення та стабільного кадрового забезпечення проєктів високоточної візуалізації.

Висновки до третього розділу

Експериментальні дослідження підтвердили, що мобільне та аеролазерне сканування забезпечує еталонну точність лінійних вимірів: розбіжність з геодезичним RTK-GNSS для ділянки М-03 склала лише 5,7 мм (0,00034%), що

дає змогу використовувати лазерне сканування як основу картографічної візуалізації автомобільних шляхів.

Перетворення координат із локальних систем (УСК-2000, NAD 83) у WGS 84 додає $\approx 0,25\%$ похибки; отже, навіть за високоточної зйомки необхідне обов'язкове управління трансформаційними помилками та зберігання «рідних» систем у метаданих для подальших перерахунків.

Порівняння довжин, отриманих за даними лазерного сканування, із розрахунками OSM, GN і GM показало, що для рівнинних і гірських ділянок найкращу метричну узгодженість забезпечує GN (СКП 0,23–0,44 м), тоді як GM і OSM демонструють коливання до $\pm 1,23$ м; отже, вибір платформи істотно впливає на достовірність навігаційних сервісів.

Густота лазерних відбитків критично впливає на точність у горах: при кожному дворазовому прорідженні хмари точок похибка довжин зростає в 2–4 рази швидше, ніж на рівнині. Щоб утримати помилку на рівні $< 0,35\%$, у складному рельєфі потрібна щільність $\geq 0,44$ точок/м² (крок між точками $\leq 1,5$ м), тоді як на рівнинах достатньо 0,015 точок/м² (крок між точками ≤ 8 м).

Узгодження результатів з офіційними переліками довжин (FHWA, КМУ) виявило систематичні розбіжності до ± 2 та до $\pm 19\%$ відповідно. Особливо в контексті українських доріг це доводить, що без високоточних моделей ресурсні та логістичні розрахунки можуть бути завищені або занижені на десятки кілометрів.

Алгоритм оптимізованого збору просторових даних має спиратися на адаптивне нарощування щільності хмари точок при проведенні лазерного сканування в зонах сильного ухилу, комбіноване з RTK-GNSS контрольними пунктами, автоматизованим фільтром класів «тверда поверхня» та обов'язковою валідацією через багатоджерельне порівняння. Саме така схема мінімізує накопичувані похибки при подальшій генералізації.

SWOT-аналіз свідчить, що сильними сторонами високоточних моделей є підвищення безпеки руху, скорочення витрат пального та часу, підтримка автономного транспорту і точного будівництва; слабкими – відносна висока вартість зйомки, великі обсяги даних і потреба в компетентних кадрах.

Можливості відкриваються в інтеграції методів та підходів, стійких логістичних ланцюгах та управлінні надзвичайними ситуаціями, тоді як загрози пов'язані з нерівномірним доступом до технологій, обмеженнями бюджету й ризиками втрати актуальності ПЗ.

ВИСНОВКИ

1. Систематизація просторово-часових структур автомобільних доріг показала, що «дорога» – це не просто лінійний шлях, а багаторівнева система з шести взаємопов'язаних груп компонентів – лінійних сегментів, вузлових об'єктів, штучних споруд, сервісної інфраструктури, систем безпеки та допоміжних геоінженерних елементів; їх ієрархічне кодування дозволяє без втрати метричної та топологічної узгодженості переходити між різними масштабами й точно відображати і статичні, і динамічні характеристики дорожньої мережі. Поглиблене трактування терміну «точність картографічної візуалізації», дано його широке розуміння, як точності не тільки просторової локалізації, а й точності (достовірності, оперативності) відображення часових змін під впливом короткочасних і довготривалих природних (рельєф, гідрографія, погода і кліматичні зміни, рослинність) та антропогенних (інфраструктура, дорожнє покриття, його стан тощо) факторів.

2. Найсуттєвіший вплив на точність картографічного й геоінформаційного моделювання мають три блоки чинників: організаційно-регуляторний (стандарти ISO 19115, наявність фахових кадрів), природний (рельєф, гідрографія, погода і клімат, рослинність) і технологічний (щільність лазерного сканування, якість ГНСС-контролю, алгоритми мультимасштабної генералізації); лише синхронне врахування цих блоків забезпечує метричну достовірність і оперативну актуальність дорожніх карт.

3. Експеримент, проведений на основі даних ділянок трас М-03 (Україна) й І-189 (США), довів, що алгоритм, який адаптивно змінює щільність лазерного сканування залежно від крутості ухилів, додатково фіксує RTK-GNSS контрольні пункти та автоматично фільтрує клас «тверда поверхня», зменшує середньоквадратичну похибку довжин у горах до $< 0,3\%$ (не гірше 0,44 точок/м²) і на рівнині до $< 0,05\%$ при щільності 0,02 точок/м²; таким чином, оптимізація технології збору даних кардинально підвищує метричну точність візуалізації незалежно від рельєфу.

SWOT-аналіз впровадження високоточних моделей показує підвищення рівня безпеки й економію пального для приватних водіїв і туристів, зниження витрат і підтримка більш стійких ланцюгів постачання для бізнес-логістики, покращення планування і тактичної обстановки для військових, оптимальні маршрути та швидший доступ до місць подій для служб швидкого реагування; слабкими сторонами залишаються висока вартість первинної зйомки та потреба у кваліфікованих кадрах, а головні загрози пов'язані з нерівномірним доступом до технологій та кіберризиками.

На основі проведеної роботи сформульовано наступні **рекомендації**:

1. Офіційно закріпити мінімальну щільність лазерного сканування: $\geq 0,5$ точок/м² для гір і $\geq 0,02$ точок/м² для рівнин – це базовий поріг для побудови національної високоточної цифрової моделі місцевості.
2. Оновлювати цифрову модель поверхні в складному рельєфі не рідше ніж раз на 3 роки, на рівнинах – раз на 5 років, обов'язково фіксуючи придорожні зміни гідрології, рослинності й клімату.
3. Зберігати вихідні координати в нативних системах із повними метаданими ISO 19115-1/DSTU ISO 19115-1:2021, щоби мінімізувати трансформаційні похибки та забезпечити інтероперабельність.
4. Створити на базі Національного геопорталу хмарний сервіс хмар точок, де будуть акумулюватися й зберігатися результати лазерного сканування для науки, проєктування та моніторингу просторово-часової динаміки транспортних ландшафтів.
5. Розробити інтегровані модулі для навігаційних платформ, що в реальному часі враховують рельєф, гідрографію, погоду та рослинність і попереджають користувачів про ризики на маршруті, підвищуючи цінність даних для всіх груп споживачів.
6. Відновити повноцінну освітню траєкторію з картографії й ГІС, щоб закрити кадровий дефіцит, необхідний для підтримки та розвитку високоточних картографічних сервісів .

Ненавмисні фальсифікації карт виникають із різних причин, одна з яких – невідповідність графічного лінійного символу реальній просторовій геометрії дороги: товщина знаку сприймається як ширина, а горизонтальне проектування серпантинів та ухилів систематично зменшує довжину; додатково похибки накопичуються під час багаторазових проєкційних перетворень, генералізації та конвертацій, що сумарно дає розбіжності 3-20% між картометрією та натурою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Августин Блаженний. Сповідь / пер. з лат. Ю. Мушак. Вид. 3-тє. Київ : Основи, 1999. 319 с.
2. Арсеньєва Н. О. Обґрунтування основних критеріїв функціональної класифікації автомобільних доріг. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія : Технічні науки*. 2020. Т. 31 (70). № 2 (2). С. 85–89. <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-2/15>.
3. Великий тлумачний словник сучасної української мови : 250000 / уклад. та голов. ред. В. Т. Бусел. Київ; Ірпінь : Перун, 2005. 1728 с.
4. Географічна енциклопедія України : в 3-х т. / відп. ред. О. М. Маринич. Київ : Українська радянська енциклопедія ім. М. П. Бажана, 1993. Т. 3. 480 с.
5. Геодезичний енциклопедичний словник / ред. В. Літинський. Львів : Євросвіт, 2001. 668 с.
6. Геоінформаційне картографування в Україні: концептуальні основи і напрями розвитку : монографія / Л. Г. Руденко та ін. ; ред. Л. Г. Руденко. Київ : Наукова думка, 2011. 103 с.
7. Глотов В., Петришин І. Дослідження точності визначення координат точок місцевості лазерним сканером VLP-16, встановленим на БПЛА DJI S1000. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2022. Вип. I (43). С. 101–110.
8. Гуцул Т. В. Геоінформаційна мультиагентна оптимізація планування розвитку дорожньо-транспортної мережі (на прикладі Чернівецької області): дис. ... канд. техн. наук : 05.24.01 / Київський національний університет будівництва і архітектури. Київ, 2019. 183 с.
9. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Ч. I. Проектування. Ч. II. Будівництво. [Чинний від 2016-04-01]. Київ : ДП «Укрархбудінформ», 2015. 91 с.
10. Денисик Г. І., Вальчук-Оркуша О. М. Класифікація і оптимізація дорожніх ландшафтів. *World science : International Scientific and Practical Conference*. 2017. № 8 (24). Vol. 2. С. 7–11.

11. Дмитриков О. О. Поняття про фальсифікаційну карту як невід’ємний елемент інформаційного суспільства. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2017. Вип. 25. С. 24–27.
12. Дмитриков О. О. Просторово-часові структури автомобільної мережі України: стан і перспективи картографічного моделювання. *Фізична географія та геоморфологія*. 2024. Т. 47, № 5–6 (127–128). С. 47–53. <https://doi.org/10.17721/phgg.2024.5-6.05>.
13. Дмитриков О. Поняття точності карт автотранспортних шляхів України: економічний аспект. *Часопис соціально-економічної географії*. 2024. Вип. 37. С. 92–100. <https://doi.org/10.26565/2076-1333-2024-37-09>.
14. ДСТУ 9030:2020 Географічна інформація. Методи оцінювання якості просторових даних. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. 49 с.
15. Золотунець Д. Аналіз розвитку транспортної системи з урахуванням природно-географічних чинників (на прикладі м. Чернівці). *Науковий вісник Чернівецького університету : Географія*. 2023. Вип. 845. С. 151–160. <https://doi.org/10.31861/geo.2023.845.151-160>.
16. Карпінський Ю., Лазоренко-Гевель Н. Методи збирання геопросторових даних для топографічного картографування. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. 2018. Вип. II (35). С. 204–211.
17. Макаренко Д. Є. Геологія. *Енциклопедія Сучасної України*. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2006, оновл. 2024. Т. 5. URL: <https://esu.com.ua/article-29135> (дата звернення: 18.06.2025).
18. Нефедова Н. Є. Транспортно-логістичні мережі та системи : навч. посіб. / наук. ред. О. Г. Топчієв. Одеса, 2014. 158 с.
19. Певзнер М. Ш. Основи теорії відносності. Дніпро : ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2013. 134 с.
20. Пересадько В., Дмитриков О., Джос А. Аналіз точності картографічної інформації (на прикладі відображення автомобільних шляхів України і США). *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2024. Вип. 40. Р. 32–44. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2024-40-04>.

21. Пересадько В., Дмитриков О., Єсіпов А. Вплив природних факторів на точність картографічної візуалізації просторово-часових структур автомобільних шляхів України. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2025. Вип. 41. С. 27–34. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2025-41-03>.

22. Пересадько В. А., Дмитриков О. О., Прасул Ю. І. Нова гармонізація в освіті України – старі проблеми. *Географічна наука та освіта: перспективи й інновації* : зб. матеріалів IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Переяслав, 19–20 верес. 2024 р.). Переяслав, 2024. С. 122–126.

23. Петлін В. М. Конструктивна географія : навчальний посібник. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2010. 543 с.

24. Петлін В. М. Теорія природних територіальних систем : монографія : у 4-х т. Т. 1. Загальнотеоретичні і загальнометодологічні основи природних територіальних систем. Львів : Видавничий центр ЛНУ ім. Івана Франка, 2016. 563 с.

25. Петлін В. М., Міщенко О. В. Прикладне ландшафтознавство : підручник. Луцьк : Вежа-Друк, 2021. 328 с.

26. Практичні аспекти філософії часу : монографія / ред. Є. О. Лебедь. Суми : Сумський державний університет, 2017. 155 с.

27. Про автомобільні дороги : Закон України від 08 верес. 2005 р. № 2862-IV : станом на 15 листоп. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2862-15#Text> (дата звернення: 18.06.2025).

28. Про затвердження переліку автомобільних доріг загального користування державного значення : постанова Кабінету Міністрів України від 15 груд. 2023 р. № 1318. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1318-2023-п> (дата звернення: 29.05.2025).

29. Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти : постанова Кабінету Міністрів України від 29 квіт. 2015 р. № 266. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/266-2015-%D0%BF/ed20150429#Text> (дата звернення: 29.05.2025).

30. Про затвердження переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти, та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України : постанова Кабінету Міністрів України від 29 лист. 2023 р. № 1318. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1318-2023-%D0%BF#Text> (дата звернення: 29.05.2025).

31. Про затвердження переліку наукових напрямів, спеціальностей і наукових ступенів : постанова Кабінету Міністрів України від 13 груд. 2006 р. № 1719. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1719-2006-%D0%BF/ed20061213#Text> (дата звернення: 29.05.2025).

32. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025–2027 роках : постанова Кабінету Міністрів України від 27 груд. 2024 р. № 1550. URL: https://mindev.gov.ua/storage/app/imported_content/67bdd934ccdb6.pdf (дата звернення: 29.05.2025).

33. Пугач С. Концептуалізація поняття географічний простір у науковій літературі. *Економічна та соціальна географія*. 2019. Вип. 82. С. 27–33. <https://doi.org/10.17721/2413-7154/2019.82.27-33>.

34. Пугач С., Водько О., Бакалейко В. Деякі аспекти дослідження транспортних систем регіону. *Суспільно-географічні чинники розвитку регіонів* : матеріали IV Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф., 9–10 квіт. 2020 р. Луцьк : ПП Іванюк В. П., 2020. С. 24–26.

35. Стройко Т., Бондар В. Транспортна інфраструктура України: сучасні реалії та перспективи розвитку. *Baltic journal of economic studies*. 2017. Т. 3, № 2. С. 141–146.

36. Тітова С. В., Дудун Т. В. Географічні карти та картографічний метод дослідження. Т. 2. Картографічний метод дослідження. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2017. 150 с.

37. Умовні знаки для топографічної карти масштабу 1:10 000 (СТ СЕВ 496–528) : затв. наказом М-ва екології і природних ресурсів України від 09 лип. 2001 р. № 254. Київ : Головна картографічна фабрика, 2001. URL: <https://>

gki.com.ua/files/uploads/documents/Norms/Ukrgeodesykart_norms/Um_znaki_10000_St496_528.pdf.

38. Шарковський О. М. Динамічних систем теорія. *Енциклопедія Сучасної України*. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2007. Т. 7. URL: <https://esu.com.ua/article-24339> (дата звернення: 18.06.2025).

39. Шемякін М. В., Кирилюк В. П., Прокопенко Н. А. Умовні знаки топографічних карт і планів. Ч. 1. Топографічні карти масштабів 1:100000, 1:50000, 1:25000, 1:10000. Умань : Уманський НУС, 2020. 49 с.

40. Савенко В. Я., Петрович В. В. Автомобільна дорога. *Енциклопедія сучасної України*. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 1970, оновл. 2001. Т. 1. С. 633–634.

41. Яцентюк Ю. В. Регіональні парадинамічні антропогенні ландшафтні системи : автореф. ... д-ра географ. наук. : 11.00.11 / Київський національний університет імені Тараса Шевченка. Київ, 2019. 40 с.

42. Anglin W. S. Nineteenth-Century Geometry. *Mathematics: a concise history and philosophy*. New York : Springer, 1994. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-0875-4_36.

43. Ashby N. Relativity in the global positioning system. *Living reviews in relativity*. 2003. Vol. 6. P. 1-42. <https://doi.org/10.12942/lrr-2003-1>.

44. Beaven P. J., Lawrance C. J. Terrain Evaluation for Highway Planning and Design. *Transportation research record*. 1982. № 892. Pp. 36–46. URL: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1982/892/892-007.pdf> (date of access: 14.02.2024).

45. Becker A. What Is Spacetime Really Made Of? *Scientific American*. 2022. URL: <https://www.scientificamerican.com/article/what-is-spacetime-really-made-of/> (date of access: 13.03.2024).

46. Çalışkan E. Planning of forest road network and analysis in mountainous area. *Life science journal*. 2013. Vol. 10. Pp. 2456–2465. URL: https://www.researchgate.net/publication/286553516_Planning_of_forest_road_network_and_analysis_in_mountainous_area (date of access: 04.05.2024).

47. Castells M. *The Rise of the Network Society*. Malden, MA; Oxford, UK : Blackwell, 1996. 556 p.
48. Castelvechi D., Witze A. Einstein's gravitational waves found at last. *Nature*. 2016. <https://doi.org/10.1038/nature.2016.19361>.
49. Coffin A. From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads. *Journal of Transport Geography*. 2007. Vol. 15. № 5. Pp. 396–406. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2006.11.006>.
50. Dabrio C. J. Coastal sedimentary environments and sea-level changes. *Ciências da Terra*. 2000. № 14. P. 39–54. URL: <https://cienciasdaterra.novaidfct.pt/index.php/ct-esj/article/view/178> (date of access: 17.03.2024).
51. DiSalle R. Space and Time: Inertial Frames. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* / ed. by E. N. Zalta. 2020. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/win2020/entries/spacetime-iframes/> (date of access: 17.03.2024).
52. Dron S. Aristotle's and Augustine's time structure. *Epistemological Studies in Philosophy, Social and Political Sciences*. 2013. Vol. 2, № 23. P. 101–106. URL: <https://philpapers.org/rec/DROAAA-2> (date of access: 23.03.2023).
53. Einstein A. Relativity: The Special and General Theory. URL: <https://www.marxists.org/reference/archive/einstein/works/1910s/relative/relativity.pdf> (date of access: 15.03.2025).
54. Dykes J., MacEachren A. M., Kraak M.-J. *Exploring Geovisualization* Amsterdam : Elsevier Ltd (Pergamon);- International Cartographic Association, 2005. 710 p.
55. Forman R., Alexander L. Roads and Their Major Ecological Effects. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1998. Vol. 29. Pp. 207–231. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.29.1.207>.
56. GIS Dictionary. *Esri*. URL: <https://support.esri.com/en-us/gis-dictionary/spatial-data> (date of access: 14.03.2025).
57. Hägerstrand T. What About People in Regional Science? *Papers of the Regional Science Association*. 1970. Vol. 24. Pp. 7–21. <https://doi.org/10.1007/BF01936872>.

58. Hausdorff F. Set Theory. 4th corrected ed. New York : AMS-Chelsea Publishing, 2005. 352 p. URL: <https://www.scribd.com/document/291614758/Felix-Hausdorff-Set-Theory-2005> (date of access: 17.03.2024).
59. Haxtatter E. Nightmare on GIS street: accuracy, datums, and geospatial data - GPS world. *GPS World*. URL: <https://www.gpsworld.com/nightmare-on-gis-street-accuracy-datums-and-geospatial-data/> (date of access: 18.06.2025).
60. Heinzmann G., Stump D. Henri Poincaré. *Stanford Encyclopedia of Philosophy Archive* / ed. by E. N. Zalta, U. Nodelman. 2013, ОНОВЛ. 2021. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/sum2024/entries/poincare/> (date of access: 17.03.2024).
61. Hilgevoord J. Time in quantum mechanics. *American Journal of Physics*. 2002. Vol. 70, Issue 3. P. 301–306. <https://doi.org/10.1119/1.1430697>.
62. Hilgevoord J., Uffink J. Quantum Field Theory. *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. First publ. 2006; substantive revision 2020. URL: <https://plato.stanford.edu/entries/quantum-field-theory/> (date of access: 06.04.2024).
63. Hilgevoord J., Uffink J. The Uncertainty Principle. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* / ed. by E. N. Zalta, U. Nodelman. 2024. URL: <https://plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty/> (date of access: 17.03.2023).
64. James Hutton (1726–1797): The Founder of Modern Geology. *American Museum of Natural History (AMNH)*. URL: <https://www.amnh.org/learn-teach/curriculum-collections/earth-inside-and-out/james-hutton> (date of access: 09.12.2023).
65. Hutton J. Theory of the Earth. Edinburgh : Creech, 1795. Vol. 2. URL: <https://sacred-texts.com/earth/toe/index.htm#contents> (date of access: 28.03.2024).
66. International chronostratigraphic chart v. 2018 / K. M. Cohen et al. ; *International Commission on Stratigraphy*. URL: <https://stratigraphy.org/chart> (date of access: 05.12.2023).
67. International Standard Classification of Education ISCED 1976. *UNESCO*. URL: https://www.ubos.org/wp-content/uploads/publications/03_2018International_Standard_Classification_of_Education__March_1976.pdf (date of access: 28.03.2024).

68. International Standard Classification of Education ISCED 1997. *UNESCO*. URL: https://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/international-standard-classification-of-education-1997-en_0.pdf (date of access: 17.06.2025)..

69. International Standard Classification of Education ISCED 2011. *UNESCO; UNESCO Institute for Statistics*. URL: <https://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/international-standard-classification-of-education-isced-2011-en.pdf> (date of access: 17.06.2025).

70. ISO 19157:2013 Geographic information – Data quality / International Organization for Standardization, 2013. URL: <https://www.iso.org/standard/53798.html> (date of access: 17.06.2025).

71. Zasady redakcji map w skali 1:50 000 (K-2.2) / Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Warszawa, 1998. 56 p. URL: https://opendata.geoportal.gov.pl/PrzepisyHistoryczne/Wytyczne/K-2.2_Zasady_redakcji_map_w_skali_50000_1998.pdf (date of access: 12.03.2024).

72. Kemerling G. Complex Ideas. A Guide to Locke's Essay. *The Philosophy Pages*. 2011. URL: <https://www.philosophypages.com/locke/g02.htm> (date of access: 12.03.2024).

73. Kirshner R. P. Hubble's diagram and cosmic expansion. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 2004. Vol. 101. № 1. P. 8–13. <https://doi.org/10.1073/pnas.2536799100>.

74. Kweon H., Seo J. I., Lee J.-W. Assessing the Applicability of Mobile Laser Scanning for Mapping Forest Roads in the Republic of Korea. *Remote sensing*. 2020. Vol. 12, Issue 9. <https://doi.org/10.3390/rs12091502>.

75. Légende des cartes topographiques au 1:25 000 / Institut Géographique National. URL: <https://cheminscreux.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/02/lc3a9gende-des-cartes-ign-au-1-25000c3a8me.pdf> (date of access: 23.03.2024).

76. Leibniz G. W., Clarke S. The Leibniz–Clarke Correspondence: together with extracts from Newton's Principia and Opticks / ed. by H. G. Alexander. Manchester; New York : Manchester University Press, 1956. URL: <https://archive.org/details/leibnizclarkecor00clar> (date of access: 22.03.2024).

77. Liang J., Zong H. Temporal and Spatial Pattern of Expressway Construction in China from 1999 to 2019 and its Correlation with Regional Economic Growth. *Land*. 2024. Vol. 13. Issue 12. <https://doi.org/10.3390/land13122041>.

78. Martijn M. Imagine a place: geometrical and physical space in proclus. *Space: a history* / ed. by A. Janiak. New York : Oxford Academic, 2020. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199914104.003.0004>.

79. Minkowski H. Address to the 80th Assembly of German Natural Scientists and Physicians, September 21, 1908. *Lib Quotes*. URL: <https://libquotes.com/hermann-minkowski/quote/lbq8h1z> (date of access: 23.03.2024).

80. Minkowski H. Raum und Zeit. *Jahresbericht der Deutschen Mathematiker-Vereinigung*. 1909. Vol. 18. Pp. 75–88. URL: <http://eudml.org/doc/145167> (date of access: 23.03.2024).

81. Newton I. The Mathematical Principles of Natural Philosophy / пер. на англ. Ендрю Мотт. Лондон, 1729. URL: https://archive.org/details/bub_gb_Tm0FAAAAQAAJ/page/n11/mode/2up (дата звернення: 15.03.2024).

82. Provincial Highways Traffic Volumes 1988–2021 / Ontario Ministry of Transportation. Toronto, 2022. URL: https://www.library.mto.gov.on.ca/SydneypLUS/TechPubs/Theme.aspx?r=702797&f=files%2fProvincial_Highways_traffic_Volumes_1988-2021.pdf (date of access: 17.06.2025).

83. Penrose R. The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe. London : Jonathan Cape, 2004. 1094 p. URL: https://archive.org/details/roadtorealitycom0000penr_x5d7 (date of access: 17.06.2025).

84. Peppe D. J., Deino A. L. Dating Rocks and fossils Using Geologic Methods. *Nature education knowledge*. 2013. Vol. 4, № 10. URL: <https://www.nature.com/scitable/knowledge/library/dating-rocks-and-fossils-using-geologic-methods-107924044/> (date of access: 24.03.2024).

85. Peuquet D. J. It's About Time: A Conceptual Framework for the Representation of Temporal Dynamics in Geographic Information Systems. *Annals of*

the Association of American Geographers. 1994. Vol. 84, № 3. Pp. 441–461. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1994.tb01869.x>.

86. Rickles D. Quantum gravity. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. 2015. URL: <https://plato.stanford.edu/entries/quantum-gravity/> (date of access: 12.12.2023).

87. Rodrigue J.-P. *The Geography of Transport Systems*. 5th ed. New York : Routledge, 2020. 456 p.

88. Rui Y., Ban Y., J. Exploring the patterns and evolution of self-organized urban street networks through modeling. *The European Physical Journal B*. 2013. Vol. 86, № 3. Art. 74. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2012-30235-7>.

89. Rynasiewicz R. Newton's Views on Space, Time, and Motion. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* / ed. by E. N. Zalta. 2022. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/spr2022/entries/newton-stm/> (date of access: 17.03.2024).

90. Saporta M. Hurricane Helene causing event cancellations in Atlanta. URL: https://saportareport.com/hurricane-helene-causing-event-cancellations-in-atlanta/sections/reports/maria_saporta/ (date of access: 17.06.2025).

91. Sattler B. Space in Ancient Times: From the Beginning to Aristotle. *Space: A History* / ed. by A. Janiak. New York, 2020. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199914104.003.0002>.

92. Schutz B. F. *Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity*. Cambridge : Cambridge University Press, 2003. 462 p.

93. Smith W. (ed.) *A Dictionary of Greek and Roman Antiquities*. London : Taylor and Walton, 1842. 1139 p. URL: https://archive.org/details/dictionaryofgree00smit_5/page/n5/mode/2up?view=theater (date of access: 26.05.2024).

94. Space: Physics and Metaphysics. *Encyclopædia Britannica*. 2025. URL: <https://www.britannica.com/science/space-physics-and-metaphysics> (date of access: 13.03.2025).

95. Standards and Guidelines for the Geomatics Community: The National Topographic System of Canada / Government of Canada Publications. Ottawa :

Natural Resources Canada, 2014. 74 p. URL: https://publications.gc.ca/collections/collection_2016/rncan-nrcan/M103-3-2-2014-eng.pdf (date of access: 13.03.2025).

96. Stang N. F. Kant's Transcendental Idealism. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* / ed. by E. N. Zalta, U. Nodelman. 2024. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/spr2024/entries/kant-transcendental-idealism/> (date of access: 17.03.2024).

97. Topographic Map Symbols / U.S. Geological Survey. Reston, Virginia : U.S. Department of the Interior, 2005. 73 p. URL: <https://pubs.usgs.gov/gip/TopographicMapSymbols/topomapsymbols.pdf> (date of access: 17.06.2025).

98. Space in the Seventeenth Century. *Space: A History* / ed. by A. Janiak. New York : Oxford Academic, 2020. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199914104.003.0010>.

99. Sylla E. D. Concepts of Space in the Fourteenth Century: Works of Nicole Oresme. *Space: A History* / ed. by A. Janiak. New York : Oxford Academic, 2020. <https://doi.org/10.1093/oso/9780199914104.003.0006>.

100. Temporal GIS and Spatiotemporal Data Sources / K. R. Ferreira et al. *Brazilian Journal of Cartography*. 2018. Vol. 68, № 6. <https://doi.org/10.14393/rbcv68n6-44492>.

101. Toporama – Mapping Tool. *The Atlas of Canada*. Natural Resources Canada, 2025. URL: <https://atlas.gc.ca/toporama/en/index.html> (date of access: 17.06.2025).

102. The Ecological Effects of Linear Infrastructure and Traffic Challenges and Opportunities of Rapid Global Growth / R. van der Ree, D. J. Smith, Cl. Grilo. *Handbook of Road Ecology*. Chichester, West Sussex : Wiley-Blackwell (John Wiley & Sons Ltd), 2015. XXVI. Pp. 1–9. <https://doi.org/10.1002/9781118568170.ch1>.

103. The Higher Education Classification of Subjects (HECoS) URL: <https://www.hesa.ac.uk/collection/coding-manual-tools/hecoscahdata/hecos> (date of access: 01.04.2024).

104. Transport Geographies: Mobilities, Flows and Spaces / R. D. Knowles, J. Shaw, I. Docherty. Malden, MA; Oxford, UK : Wiley-Blackwell, 2008. 320 p.

105. Trombulak S., Frissell C. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities. *Conservation Biology*. 2000. Vol. 14. №. 1. P. 18–30. <https://doi.org/10.1046/j.15231739.2000.99084.x>.

106. M25 to Solent – A3 and M3 Strategic Study: Final Report / UK Department for Transport. London, 2017. URL: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5a757d78ed915d6faf2b3656/M25_to_Solent_A3_and_M3_Final.pdf (date of access: 17.06.2025).

107. Wegener M., Fürst F. LandUse Transport Interaction: State of the Art. Dortmund : Institut für Raumplanung (IRPUD), 2004. 120 p. URL: <https://econwpa.ub.uni-muenchen.de/econ-wp/urb/papers/0409/0409005.pdf> (date of access: 01.04.2024).

108. Xie F., Levinson D. E. Evolving Transportation Networks. New York : Springer, 2011. 278 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9804-0>.

109. Zeyl D., Sattler B. Plato's Timaeus. *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* / ed. by E. N. Zalta, U. Nodelman. 2023. URL: <https://plato.stanford.edu/archives/fall2023/entries/plato-timaeus/> (date of access: 17.06.2024).

110. Банк даних. Державна служба статистики України : офіційний вебсайт. URL: [https://stat.gov.ua/uk/explorer?urn=SSSU:DF_GROUND_TRANSPORT_2\(25.0.0\)...](https://stat.gov.ua/uk/explorer?urn=SSSU:DF_GROUND_TRANSPORT_2(25.0.0)...) (дата звернення: 18.06.2025).

111. Горін Н. Радянська економічна інтеграція чи індустріальний колоніалізм? *Heinrich Böll Stiftung. Київ - Україна*. 2022. URL: <https://ua.boell.org/en/2022/09/01/soviet-economic-integration-or-industrial-colonialism> (дата звернення: 18.06.2025).

112. Національна інфраструктура геопросторових даних (НІГД). URL: <https://nsdi.gov.ua/> (дата звернення: 17.06.2025).

113. AAA-Signaturen-katalog 2.0 / Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV). URL: <https://www.adv-online.de/GeoInfoDok/Signaturen-kataloge/AAA-Signaturen-katalog-2.0/> (date of access: 22.04.2024).

114. Arrêté du 22 janvier 2014 fixant la nomenclature des mentions du diplôme national de licence (2024). URL: <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/LEGISCTA000028545006> (date of access: 22.04.2024).

115. Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). URL : <https://www.dfg.de/> (date of access: 22.04.2024).

116. Gares de péage du réseau routier national concédé. URL: <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/gares-de-peage-du-reseau-routier-national-concede/> (date of access: 17.06.2025).

117. Géoportail / Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). URL: <https://www.geoportail.gouv.fr/carte> (date of access: 17.06.2025).

118. Geoportal krajowy Polski. URL: <https://mapy.geoportal.gov.pl/imapnext/imap/index.html?moduleId=modulGiK&mapview=52.381795%2C21.344002%2C4000000s> (date of access: 17.06.2025).

119. Geoportal.de : портал просторових даних / Федеральне агентство з картографії та геодезії (BKG). URL: <https://www.geoportal.de> (date of access: 17.06.2025).

120. Google Maps. URL: <https://www.google.com/maps> (date of access: 17.06.2025).

121. GraphHopper Maps. URL: <https://graphhopper.com/maps> (date of access: 17.06.2025).

122. Highway Functional Classification: Concepts, Criteria and Procedures / U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. Washington, D.C., 2023. URL: <https://www.fhwa.dot.gov/planning/processes/statewide/related/hwy-functional-classification-2023.pdf> (date of access: 26.03.2025).

123. Hochschulrektorenkonferenz (HRK). URL: <https://www.hrk.de/> (date of access: 17.06.2025).

124. Hurricane Helene Brings Rain and Wind to AutoCamp Asheville. URL: <https://autocampreviews.com/hurricane-helene-autocamp-asheville-impact/> (date of access: 17.06.2025).

125. Intensywny rozwój sieci dróg szybkiego ruchu. Kończymy kluczowe połączenia i projektujemy zupełnie nowe / Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. 2023. URL: <https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/pl/a/39194/Intensywny-rozwoj-sieci-drog-szybkiego-ruchu-Konczymy-kluczowe-polaczenia-i-projektujemy-zupelnie-nowe> (date of access: 17.06.2025).

126. Interstate Highway System Route Finder / U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. URL: https://www.fhwa.dot.gov/planning/national_highway_system/interstate_highway_system/routefinder/table01.cfm (date of access: 17.06.2025).

127. National Center for Education Statistics (NCES). URL: <https://nces.ed.gov/> (date of access: 17.06.2025).

128. Neubau der PWC-Anlage Sür. *Autobahn GmbH des Bundes*. URL: <https://www.autobahn.de/planen-bauen/projekt/neubau-der-pwc-anlage-suer> (date of access: 17.06.2025).

129. OpenStreetMap. URL : <https://www.openstreetmap.org> (date of access: 17.06.2025).

130. OS Maps / Ordnance Survey. URL: <https://explore.osmaps.com/> (date of access: 17.06.2025).

131. OS Landranger Map 1:50 000 – Legend / Ordnance Survey. URL : <https://www.ordnancesurvey.co.uk/documents/product-support/support/50k-raster-legend.pdf> (date of access: 17.06.2025).

132. Rozporządzenie Ministra Edukacji i Nauki z dnia 6 września 2022 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych. URL: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20220002202> (date of access: 15.04.2024).

133. Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin artystycznych. URL: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20180001818> (date of access: 15.04.2024).

134. Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 4 sierpnia 2011 r. w sprawie klasyfikacji dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dziedzin

sztuki i dyscyplin artystycznych. URL: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20111791065> (date of access: 15.04.2024).

135. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 8 września 1992 r. w sprawie klasyfikacji specjalności i dziedzin nauki. URL: <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WMP19920160123> (date of access: 15.04.2024).

136. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). URL: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm> (date of access: 15.06.2024).

137. Spatial data. *GIS Dictionary*. URL: <https://support.esri.com/en-us/gis-dictionary/spatial-data> (date of access: 14.03.2025).

138. Statistics Canada. URL: <https://www150.statcan.gc.ca/> (date of access: 15.04.2024).

139. The National Map Viewer / U.S. Geological Survey. URL: <https://apps.nationalmap.gov/viewer/> (date of access: 17.06.2025).

140. USGS LidarExplorer: інтерактивна карта для перегляду та завантаження LiDARданих. *The National Map*. URL: <https://apps.nationalmap.gov/lidar-explorer/#/> (date of access: 10.05.2025).

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Публікації у наукових виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України:

1. Дмитриков О. Поняття про фальсифікаційну карту як невід’ємний елемент інформаційного суспільства. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2017. Вип. 25. С. 24–27.

Ключові слова: картографія, інформація, дезінформація, етимологія терміну «фальсифікація», картографічний твір, фальсифікаційна карта.

Режим доступу: <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/9084/8607>

2. Пересадько В., Дмитриков О., Джос А. Аналіз точності картографічної інформації (на прикладі відображення автомобільних шляхів України і США). *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2024. Вип. 40. С. 32–39.

Ключові слова: транспортна мережа, автомобільні шляхи, точність карт, картографічне моделювання, Google Maps, OpenStreetMap, модель GraphHopper, лазерне сканування.

DOI: 10.26565/2075-1893-2024-40-04

URL: <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/25866>

(*Особистий внесок здобувача*: обґрунтування точності вимірювань горизонтальних прокладень і довжин відстаней різними способами, створення порівняльних таблиць і формування висновків щодо невідповідності представлених в картографічних матеріалах і програмних продуктах довжин ліній їх фактичним розмірам).

(*Пересадько В.*: Аналіз зарубіжного досвіду, представлення оновленої концепції поняття точності карти).

(*Джос А.*: Перевірка результатів дослідження у фондових матеріалах «Укргеодезкартографії»).

3. Дмитриков О. Поняття точності карт автотранспортних шляхів України: економічний аспект. *Часопис соціально-економічної географії*. 2024. Вип. 37. С. 92–100.

Ключові слова: економічні наслідки, точність карт, картографічне моделювання автомобільних шляхів, картографічна похибка, логістичні витрати, лідарні дані, геодезична основа карт автошляхів

DOI: 10.26565/2076-1333-2024-37-09

URL: <https://periodicals.karazin.ua/soccecongeo/issue/view/1557>

4. Дмитриков О. О. Просторово-часові структури автомобільної мережі України: стан і перспективи картографічного моделювання. *Фізична географія та геоморфологія*. 2024. Т. 47, № 5–6 (127–128). С. 47–53.

Ключові слова: просторово-часові структури, автомобільна мережа, картографічне моделювання, ГІС-технології, лазерне сканування, динамічні зміни

DOI: 10.17721/phgg.2024.5-6.05

URL: <https://phgg.knu.ua/archive/47/3/47>

5. Пересадько В., Дмитриков О., Єсіпов А. Вплив природних факторів на точність картографічної візуалізації просторово-часових структур автомобільних шляхів України. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2025. Вип. 41. С. 27–34.

(*Особистий внесок здобувача: обґрунтування впливу рельєфу на точність картографічної візуалізації просторово-часових структур автомобільних шляхів України і деяких країн світу, систематизація природних факторів *рельєф, гідрографія, погодно-кліматичні умови, рослинність в єдину систему*).

(*Пересадько В.: обґрунтування впливу кліматичних факторів і погодних умов на ступінь картографічної візуалізації часових структур*).

(*Єсіпов А.: збір вихідних матеріалів щодо впливу придорожньої рослинності на безпеку руху транспорту*).

Ключові слова: автомобільні шляхи, точність карт, картографічна візуалізація, природні фактори, підтоплення, паводки, гідрометеорологічні

умови, небезпечні погодні умови, природні ландшафти, рослинність, умовні знаки, легенди карт, Google Maps, OpenStreetMap

DOI: 10.26565/2075-1893-2025-41-03.

URL: <https://periodicals.karazin.ua/pbgok/article/view/26573>

**Наукові публікації, які засвідчують апробацію матеріалів
дисертаційного дослідження:**

1. Пересадько В. А., Дмитриков О. О., Прасул Ю. І. Нова гармонізація в освіті України – старі проблеми. *Географічна наука та освіта: перспективи й інновації* : зб. матеріалів IV Міжнар. наук.-практ. конф. (Переяслав, 19–20 верес. 2024 р.) / редкол.: Коцур В. В., Руденко Л. Г., Маруняк Є. О. та ін. Переяслав, 2024. С. 122–126.

2. **Дмитриков О. О.** Картографічна освіта як один із інструментів вирішення екологічних проблем в Україні: сучасні виклики та перспективи. *Охорона довкілля* : зб. наук. ст. XX Всеукр. наук. Таліїв. читань (Харків, 25 жовт. 2024 р.) / ХНУ імені В. Н. Каразіна, Навч.-наук. ін-т екології. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. С. 115–117.

ДМИТРИКОВ ОЛЕГ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

Результат перевірки підпису	Signature is valid
П.І.Б.	ДМИТРИКОВ ОЛЕГ ОЛЕКСАНДРОВИЧ
РНОКПП	3360902976
Організація (установа)	ФІЗИЧНА ОСОБА
Код ЄДРПОУ	
Посада	
Час підпису (підтверджено кваліфікованою позначкою часу для даних від Надавача)	10:13:29 24.06.2025
Сертифікат виданий	КНЕДП АЦСК АТ КБ "ПРИВАТБАНК"
Серійний номер	5E984D526F82F38F04000000AABDD2019A496906
Тип носія особистого ключа	Захищений
Алгоритм підпису	dstu4145
Тип підпису	Кваліфікований
Формат підпису	CAdES-T
Сертифікат	Кваліфікований