

КОНСТРУКТИВНА ГЕОГРАФІЯ І ГЕОЕКОЛОГІЯ

УДК 911.9

DOI: <https://doi.org/10.25128/2519-4577.25.1.19>Ігор ХОЛОШИН, Мирослав СИВИЙ, Наталя ПАНТЕЛЄЄВА, Ольга МАЗИКІНА
ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ МЕРЕЖІ АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРІГ МІСТА КРИВИЙ РІГ (УКРАЇНА) ДЛЯ СТАЛОГО РОЗВИТКУ РЕГІОНУ

Стаття демонструє важливість геоінформаційних технологій для аналізу дорожньої інфраструктури та прийняття рішень щодо розвитку транспортних мереж. Використання QGIS дозволяє проводити детальний аналіз мережі доріг, оцінювати їх доступність і ефективність, що сприяє поліпшенню інфраструктури і забезпеченню сталого розвитку в урбанізованих районах. Аналіз геопросторових даних допомагає визначати ключові проблеми в вулично-дорожній мережі та пропонувати можливі шляхи їх вирішення.

Ключові слова: геопросторовий моніторинг, географічні інформаційні системи, структура мережі, щільність доріг, щільність перехресть, ефективність мережі; цифрова модель рельєфу; карта схилів рельєфу.

Abstract:

Ihor KHOLOSHIN, Myroslav SYVYJ, Natalia PANTELEEVA, Olga MAZYKINA. GEOSPATIAL ANALYSIS OF THE ROAD NETWORK OF THE CITY OF KRIVYI RIH (UKRAINE) FOR THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE REGION

The road network of the city of Kryvyi Rih is an example of the adaptation of the street and road network to their historical and economic development. The city was formed as a result of the historical unification of the territories of individual mining villages and microdistricts that arose around the mines, which were located along narrow (up to several kilometers) iron ore strips stretching from north to south for more than 100 km. In fact, the modern elongated linear structure of the city is the result of this historical process, which is considered a key factor in almost all aspects of its development and primarily influenced the development of motor highways. Thus, the main transport highways of the city of Kryvyi Rih stretch from north to south, which significantly increases the distances between districts and creates a significant load on the main transport arteries.

The purpose of the study is to conduct a geospatial analysis of the road network of the city of Kryvyi Rih in order to improve its functionality.

The work is based on geodata on the city's street and road network, which were obtained from the crowdsourced platform Open Street Map in Shape file format. Geospatial analysis of the city's road network was performed using the open source QGIS program.

The city actually consists of several separate districts, interconnected by highways of various types - from wide main streets of city and district significance, which provide connections within the settlement, to residential streets and driveways, the main purpose of which is access to buildings and structures. In addition, important main roads connecting different regions of Ukraine pass through the city.

Geospatial analysis of the Kryvyi Rih highway network has shown that different types of city highways differ in their structure. Thus, main roads form a radial scheme, which is characterized by a network of roads in the form of radial lines, which diverge in the form of rays from three centers. Main streets of city and district significance form a combined scheme and are a combination of several structures. It is based on a radial structure, which is unloaded by means of highways in the form of rectangular and linear structures. The rectangular structure of the city street and road network dominates in the organization of motor transport traffic on residential streets, especially newly built microdistricts of the residential area. For thoroughfares, a free structure scheme with a disordered street and road network is characteristic.

The density of the road network within the city varies unevenly. The largest number of roads is observed along two conditional axes (vertical and horizontal), each of which divides the city, respectively, into two parts. These "hot" zones actually provide the majority of intra-city and transit passenger and freight traffic. The basis of these zones are highways and main roads, which carry the main load of motor vehicle traffic. Residential and through roads provide the interconnection between main roads and their connection with the territories of residential areas.

In Kryvyi Rih, road crossings and junctions are carried out mainly at the same level, at the expense of intersections. The city's road network includes almost 26 thousand intersections, which corresponds to a density of 60 intersections per km². It should be noted its significant spatial correlation with the road density indicator: the largest number of intersections is along the transport axis connecting the north and south of the city. The general street and road network differs from the network of highways and main streets of city and district significance by an abnormally high number of intersections in the historical center of the city. There are two "hot" zones, which correspond mainly to intersections formed by residential and through roads. The influence of natural and anthropogenic relief on the city's road network is limited mainly to determining the directions of highways and main roads.

The development of the road network of the city of Kryvyi Rih lags behind its real needs; today the network is unable to simultaneously and effectively pass the number of vehicles that are in the city. The uneven development of the road network and its topology on the territory of the city has been revealed, which often does not correspond to the

dynamic capabilities and directions of the predominant movement of intra-city and transit transport. The lack of a sufficient number of alternative routes for connecting highway and main road nodes characterizes the network as one that has a low level of redundancy. This primarily concerns the movement of transit transport, most of which moves through the central areas of the city.

Keywords: *geospatial monitoring; geographic information systems; network structure; road density; intersection density; network efficiency; digital terrain model; relief slope map.*

Постанова науково-практичної проблеми, актуальність і новизна дослідження. Кожного року в Україні збільшується кількість транспортних засобів. Так, наприклад, за даними Єдиного державного реєстру транспортних засобів за останні три роки кількість офіційно зареєстрованих автомобілів в країні зросла більш ніж на третину: з 10,2 млн на кінець 2021 року до 13,16 млн на березень 2024 року. Враховуючи той факт, що сучасна мережа автомобільних доріг України була переважно сформована до 90-х років XX сторіччя, то зрозуміло наскільки сьогодні ускладнений рух на дорогах країни. Особливо це стосується руху в межах міст.

Мережа автомобільних доріг більшості міст України є прикладом пристосування вулично-дорожньої мережі до їх історичного та економічного розвитку. Мережа автомобільних доріг міста Кривий Ріг не є виключенням. Місто сформувалося в результаті історичного об'єднання територій окремих шахтарських селищ та мікрорайонів, що виникли навколо рудників, які були розташовані вздовж вузьких (до декілька кілометрів) залізничних смуг, що простягаються з півночі на південь більш ніж на 100 км. Фактично сучасна видовжена лінійна структура міста є результатом цього історичного процесу, що розглядається як ключовий фактор майже у всіх аспектах його розвитку (економіці, соціальній сфері, екології тощо) і в першу чергу вплинула на розвиток автотранспортних магістралей.

Так, основні транспортні магістралі міста Кривий Ріг простягаються з півночі на південь, що суттєво збільшує відстані між районами та створює значне навантаження на основні транспортні артерії. Окрім цього, велика кількість промислових підприємств, розташованих вздовж рудних покладів, створює додаткове навантаження на дорожню мережу, особливо в районі під'їзних шляхів до цих підприємств. Також суттєво ускладнюється рух і наявність великої кількості транзитного транспорту.

Як результат, мережа автомобільних доріг Кривого Рогу суттєво перенавантажена і має знижену пропускну спроможність, що негативно впливає на транспортний потік, безпеку руху та екологію регіону.

В зв'язку з цим, виникає питання просторової інвентаризації вулично-дорожньої мережі міста. Використання геопросторового аналізу в

оцінці ефективності міської дорожньої мережі – є невід'ємною складовою сталого розвитку міста, яка забезпечує баланс між економічним зростанням, соціальними потребами та охороною навколишнього середовища. Для Кривого Рогу така робота проводиться вперше.

Мета дослідження. Проведення геопросторового аналізу мережі автомобільних доріг міста Кривий Ріг з метою вдосконалення її функціональних можливостей.

Аналіз останніх публікацій за темою дослідження. Останні два десятиліття серед науковців спостерігається значний інтерес до аналізу та моделювання мережевих систем. По перше, це пов'язано з високим практичним значенням таких досліджень, а по друге – суттєвим прогресом у використанні різноманітних методик геопросторового аналізу.

Можна виділити декілька напрямків в цих дослідженнях. Вивчення просторової структури міських доріг один з найбільш поширених. Так, науковці різних країн приділяють увагу аналізу різних моделей дорожніх мереж, використовуючи при цьому різноманітні методи мережевого аналізу. Наприклад, використання фрактального методу для аналізу дорожніх мереж дає можливість покращити розуміння їх структури і функціональності [11, 18, 35-38]. Цей метод дозволяє оцінити складність мережі, виявити її слабкі місця та оптимізувати планування дорожньої інфраструктури. За допомогою фрактального аналізу можна також виявити географічні закономірності і територіальні відмінності в організації мереж, що має велике значення для сталого розвитку території [24]. Авторами розглядаються ключові особливості мережевих моделей, які враховують просторовий чинник, на прикладі реальних транспортних і комунікаційних систем [20].

Традиційне картографування автомобільних шляхів з використанням ГІС дозволяє виконувати просторовий аналіз на основі даних про дороги, інтенсивність руху та транспортну доступність [2, 6-8, 19, 26, 33, 40]. В більшості робіт [9, 14, 18, 23, 31, 39] вказується на важливість аналізу таких топологічних показників мереж, як щільність, центральність та зв'язність.

Практичні аспекти досліджень також дуже різноманітні: від аналізу геопросторових даних про дорожньо-транспортні пригоди, з подальшою оцінкою просторових та часових коре-

ляцій між аваріями і різними змінними, такими як дорожні умови, погодні умови, транспортна інфраструктура [7, 15, 27] до вивчення дорожніх мережі, як ключового фактора у економічному розвитку регіонів та процесів урбанізації [16, 17, 21, 22, 30, 36, 41]. Особливо слід відзначити монографію Жан-Поля Родріга *"The Geography of Transport Systems"* в якій детально розглядається роль транспортних мереж у формуванні економічних, соціальних та екологічних процесів, акцентуючи увагу на тому, як вони впливають на просторову організацію регіонів та глобальну економіку [32].

Загалом, ці роботи підкреслюють важливість планування та розвитку дорожніх мереж для забезпечення стійкого розвитку, зокрема в регіонах, що швидко урбанізуються. Сталий розвиток регіону можливий лише через ефективну оцінку продуктивності транспортної мережі.

Зрозуміло, що серед об'єктів досліджень домінують мегаполіси: Пекін, Лондон, Чикаго, Нью-Йорк, Шанхай тощо [17, 20, 41], в яких транспортна проблема є одною з основних в забезпеченні їх життєдіяльності, але вже багато прикладів таких досліджень і для відносно невеликих міст [4]. Як приклад можна навести дослідження просторової з'єднаності вуличних мереж міст Африки. Автори застосовують інструменти ГІС та аналізу геоданих для вивчення ефективності вуличних мереж у містах Африки, зокрема з точки зору доступності, мобільності та екологічної стійкості [30].

Стосовно України, слід погодитися з висновками Ю. Баранського та С. Пугач [1], що геопросторові особливості мереж автомобільних доріг в нашій країні вивчені недостатньо, що вимагає ретельного обґрунтування концепцій транспортної доступності, моделей та методів її дослідження, проблематики впливу транспортного чинника на географічний простір на регіональному і, особливо, локальному рівнях.

Методика дослідження. В основі роботи – геодані по вулично-дорожній мережі міста, які були отримані із краудсорсингової платформи *Open Street Map (OSM)* у форматі файлу *Shape*. Геопросторовий аналіз мережі доріг міста виконувався за допомогою програми з відкритим кодом доступу *QGIS* (рис. 1).

Важливе питання, яке постало при проведенні дослідження, це приведення у відповідність класифікації міських автомобільних доріг в Україні із тегуванням доріг *OSM*. Функціональний поділ системи автомобільних доріг являє собою об'єднання різних класів автомобільних доріг на основі їх використання, що пов'язано з їх мобільністю та доступністю [28].

В Україні, згідно із Законом України «Про автомобільні дороги» [5], а також Державними будівельними нормами України ДБН Б.2.2-12:2018 «Планування і забудова територій», вулиці і дороги міст та інших населених пунктів, які забезпечують рух автомобільного транспорту, поділяються на:

- **магістральні дороги** регульованого руху забезпечують транспортний зв'язок між районами міста на окремих напрямках і ділянках переважно вантажного руху, що здійснюється за житловою забудовою, виходячи на зовнішні автомобільні дороги, пересічення з вулицями і дорогами, як правило, на одному рівні;

- **магістральні вулиці загальноміського значення** забезпечують транспортний зв'язок між центрами міст, житловими, промисловими районами і громадськими центрами у найзначніших і значних містах, а також з іншими магістральними вулицями, міськими і зовнішніми автомобільними дорогами;

Вулиці і дороги місцевого значення, які поділяються на:

- **житлові вулиці** забезпечують зв'язок з територіями житлових районів, мікрорайонів, виходу на магістральні вулиці і дороги регульованого руху;

- **проїзди** забезпечують рух транспортних засобів до житлових і громадських будинків, установ, підприємств та інших об'єктів міської забудови у середині районів, житлових кварталів.

Автомобільні дороги в *OSM* позначаються тегом *highway*, що може мати різне значення залежно від типу і важливості конкретної дороги у дорожній мережі. Найпоширенішими значеннями цього тегу є: *motorway*, *trunk*, *primary*, *secondary*, *tertiary*, *unclassified*, *track*, *path*, *residential*, *service* і вони визначають певну ієрархію автомобільних доріг.

В таблиці 1 наведено загальну характеристику автомобільних доріг за класифікацією *OSM*, та її відповідність класифікації міських доріг в Україні. Як можна побачити, між ними спостерігається суттєва відповідність. Класифікація *OSM* відрізняється тільки більшою деталістністю в ієрархічному поділі міських доріг. Це дало можливість використовувати геопросторові дані *OSM* для геопросторового аналізу дорожньо-транспортної мережі міста Кривий Ріг за групами: *магістральні дороги*, *магістральні вулиці*, *житлові вулиці* і *проїзди*. Технологічні дороги не аналізувалися, тому що вони переважно тимчасові і не мають постійної дислокації.

Геопросторовий аналіз доріг міста проводився за двома напрямками – оцінка просторо-

вої щільності доріг та просторової щільності перехресть. Структурно-логічну схему геоп-

росторового аналізу наведено на рис. 2.

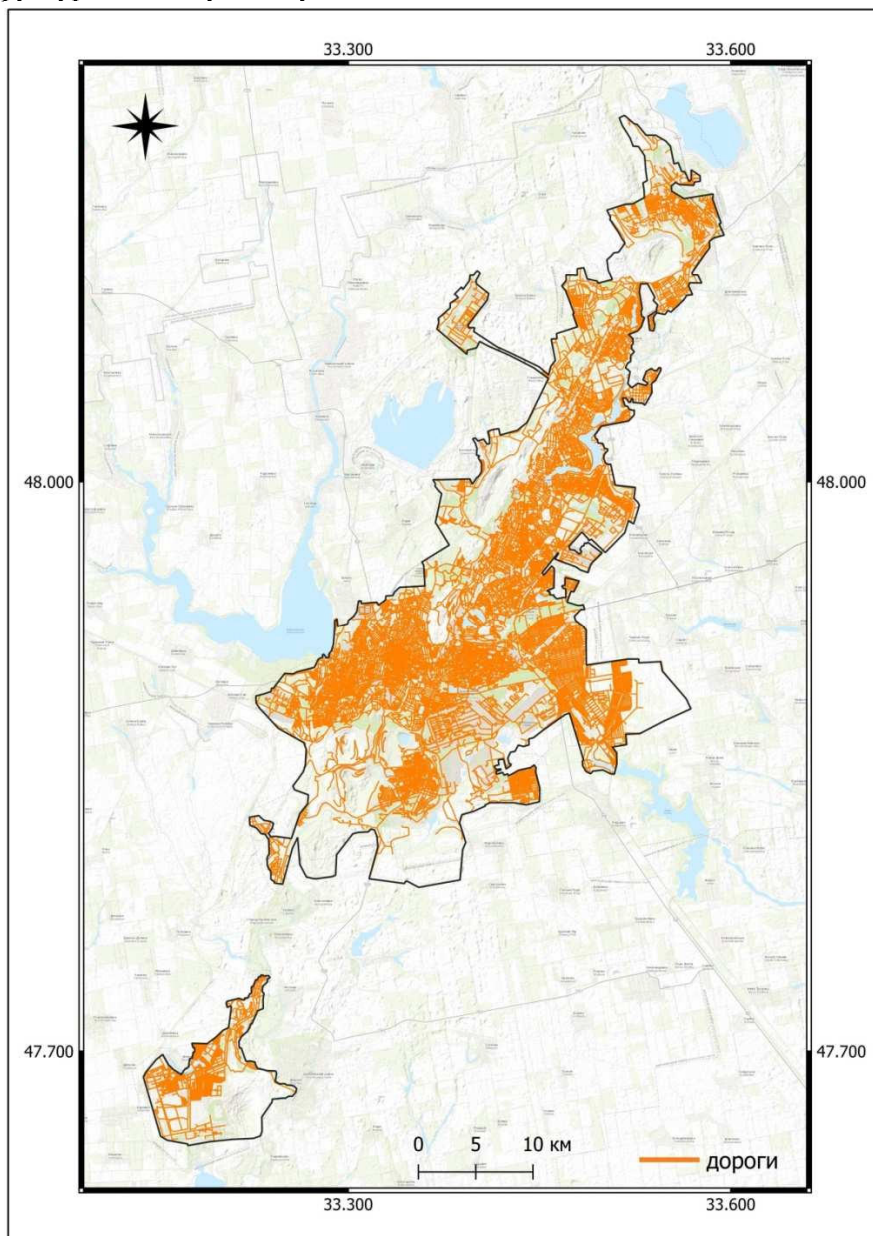


Рис. 1. Карта вулично-дорожньої мережі міста Кривий Ріг (побудовано за даними OSM в середовищі QGIS)

Просторова щільність вулично-дорожньої мережі міста Кривий Ріг визначалась за допомогою інструменту векторного аналізу *Сума довжин рядків* QGIS:

- підраховувалася загальна довжина доріг у кожній клітинці (1 км x 1 км) планіметричної сітки, накладеної на карту території міста;
- *щільність мережі* вимірювалася як відношення довжини мережі до площі території регіону:

$$Ds = L / S;$$

де Ds – показник щільності мережі;

L – довжина мережі;

S – площа території регіону.

Просторова диференціація щільності до-

ріг демонструвалася як зміною насиченості кольорів клітинок (чим вище значення, тим більш насиченим є колір) так і використанням аналітичної функції *інтерполяції триангульованої нерегулярної мережі (TIN)* точкового векторного шару.

Модель перехресть загальної вулично-дорожньої мережі та мережі магістральних вулиць загальноміського та районного значення будувалася за алгоритмом векторного накладання *Перетин ліній*, з подальшою обробкою інструментом загального вектора – *Видалити повторювання геометрії*.

Для розрахунку щільності перехресть була використана планіметрична сітка, за анало-

гією підрахунку щільності доріг, але інструментом аналізу слугувала операція *Підрахунок точок в полігоні*. Цей показник визначався як

кількість перехресть на одиницю площі (на 1 км²).

Таблиця 1

Загальна характеристика автомобільних доріг за класифікацією OSM та її відповідність класифікації міських доріг в Україні

Класифікація OSM	Загальна характеристика	Класифікація ДБН Б.2.2-12:2018
motorway	<i>автомагістралі</i>	Магістральні дороги
trunk	<i>транзитні дороги, що проходять через населений пункт</i>	
primary	<i>центральні магістралі міста</i>	
secondary	<i>основні магістралі районів міста</i>	Магістральні вулиці загальноміського та районного значення
tertiary	<i>головні вулиці стосовно до інших дрібних вулиць/провулків, основні дороги в мікрорайонах або транзитні вулиці між ними</i>	
unclassified	<i>звичайні дрібні вулиці/провулки, мають переважно нежитлові будівлі уздовж вулиць (можуть не мати твердого покриття)</i>	
track	<i>дороги сільськогосподарського призначення, лісові дороги, неофіційні тринтовки, і тому подібне, які по ширині придатні для проїзду транспортних засобів з парю коліс, таких як трактор чи джип.</i>	Вулиці і дороги місцевого значення: Житлові вулиці
path	<i>недостатньо широка для проїзду двоколісного транспортного засобу</i>	
residential	<i>звичайні дрібні вулиці/провулки, з переважно житловими будинками вздовж вулиці, транзитний рух припустимий, але не бажаний</i>	
service	<i>службові проїзди, проїзди на парковках, внутрішньодворові проїзди</i>	Проїзди

Візуалізація показників щільності вулично-дорожньої мережі міста Кривий Ріг за адміністративними районами здійснювалася способом хороплет за принципом рівнонаповнених інтервалів [13].

Цифрову модель рельєфу (ЦМР) міста створено на основі GRID-моделі обробки радіолокаційних супутникових знімків (SRTM) місцевості з роздільною здатністю 30 метрів (отримано на USGS Earth Explorer). ЦМР послужила основою для створення карти схилів території міста.

Виклад основного матеріалу. Кривий Ріг є одним з найдовших міст Європи, що зумовило значну протяжність та розгалуженість його дорожньої мережі. Місто фактично складається з кількох окремих районів, з'єднаних між собою автомобільними шляхами різних типів - від широких *магістральних вулиць загальноміського та районного значення*, які забезпечують зв'язки всередині населеного пункту, до *житлових вулиць та проїздів*, головне призначення яких – доступ до будівель і споруд. Окрім цього, через місто проходять важливі *магістралі*, що з'єднують різні регіони України: дві національного значення (Дніпропетровськ-Кривий Ріг-Миколаїв та Кіровоград-Кривий

Ріг-Запоріжжя) і по одній, регіонального (П'ятихатки-Кривий Ріг-Широке) та територіального (Степове-Кривий Ріг- Ордо-Василівка). При цьому жодна з магістральних доріг не має обходу міста Кривого Рогу і як результат, транзитні транспортні потоки суттєво перевантажують міську мережу.

Сукупність всіх цих доріг і формує мережу автомобільних доріг міста (рис.3), яка забезпечує його економічний і соціальний розвиток, з'єднуючи різні функціональні зони [25]. Як показали підрахунки, загальна довжина мережі автомобільних доріг міста 3628,5 км (без врахування технологічних, промислових доріг). Домінують житлові дороги (майже 72% від загальної довжини) та проїзди (18%). Відповідно, щільність цих доріг найбільша – 6,02 км / км² у житлових і 1,55 км / км² у проїздів. У магістральних доріг щільність - 0,17 км / км², а у магістральних вулиць – 0,70 км / км² (таблиця 2).

Згідно з Державними будівельними нормами України [3], щільність магістральних міських доріг повинна знаходитися в діапазоні 2 – 2,5 км/км² у периферійних районах і збільшена до 3 – 3,5 км/км² у центральній частині міста. Для Кривого Рогу ці показники нижчі у декілька разів.

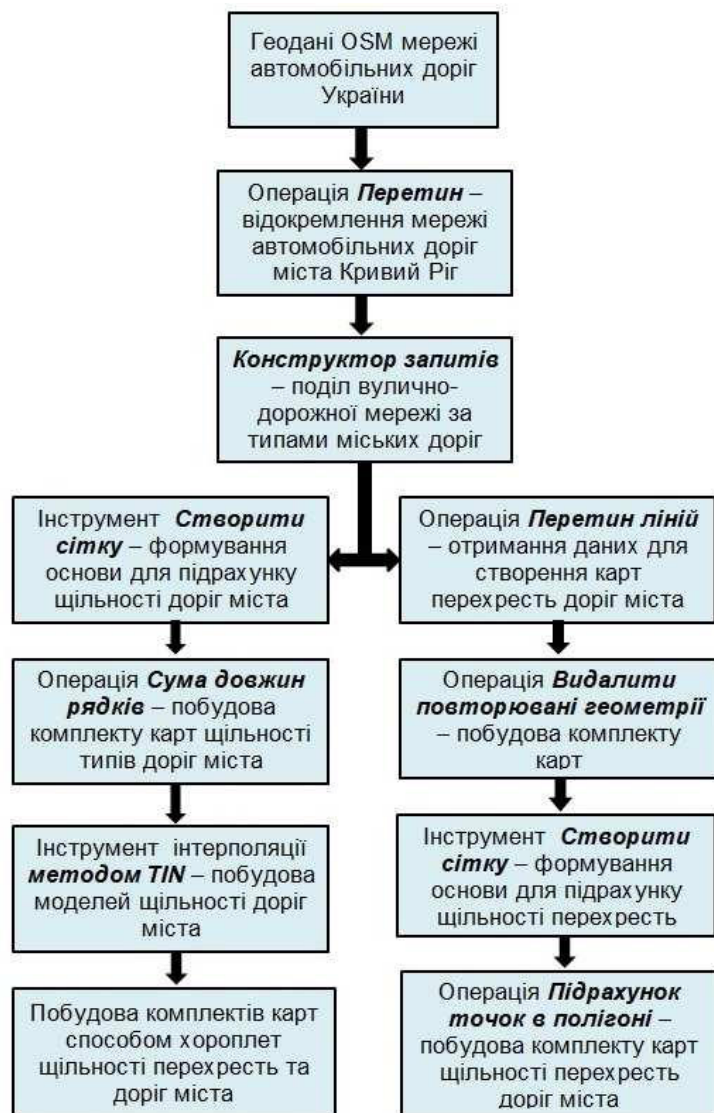


Рис. 2. Структурно-логічна схема методики геопросторового аналізу вулично-дорожньої мережі міста Кривий Ріг у QGIS

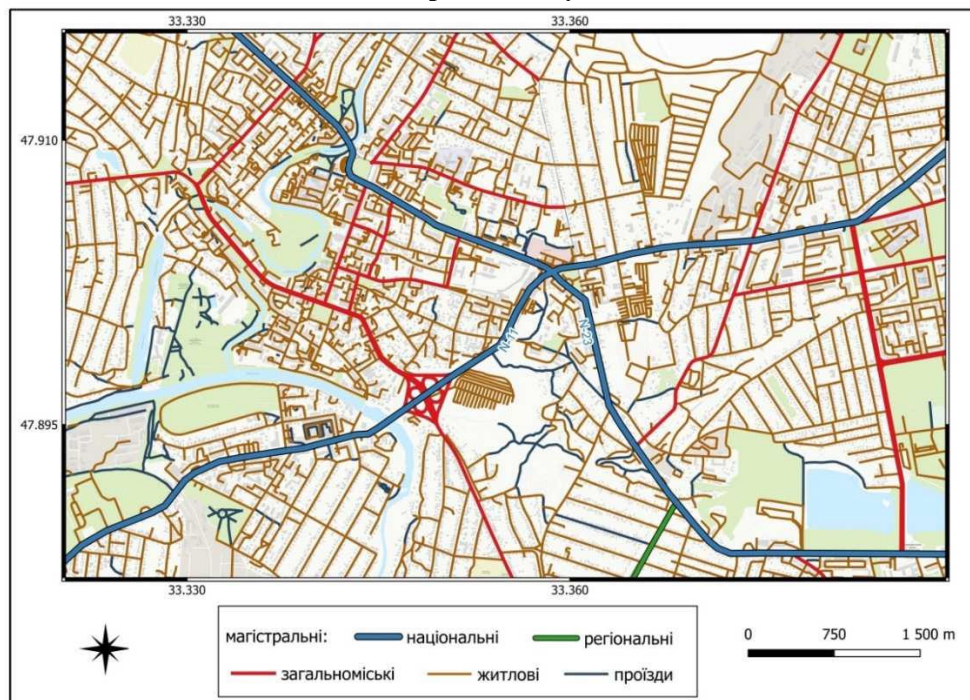


Рис. 3. Фрагмент побудови мережі автомобільних шляхів міста Кривий Ріг

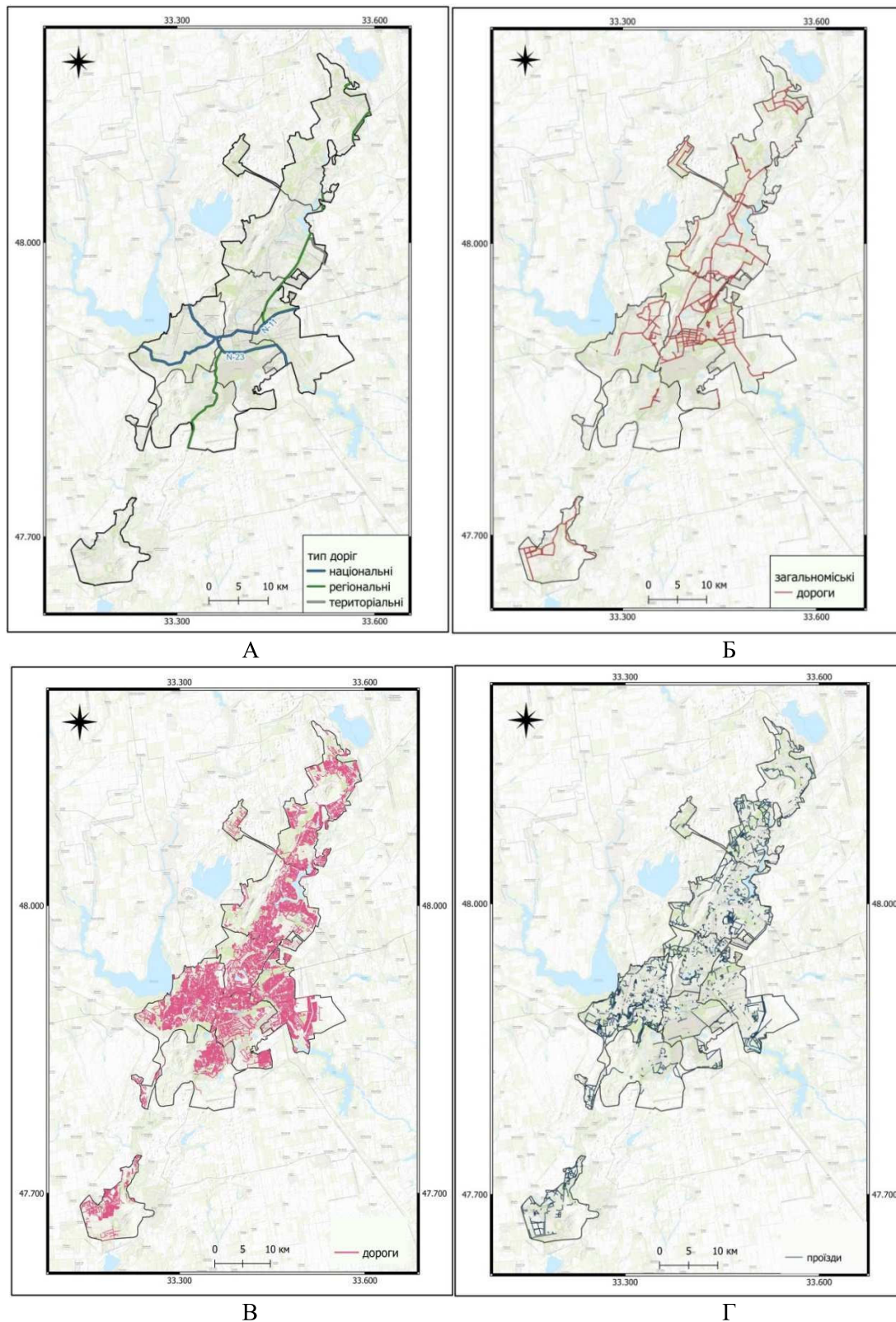


Рис. 4. Мережа міських автомобільних доріг міста Кривий Ріг:
А – магістральні дороги, Б – магістральні вулиці загальноміського та районного значення; В – житлові вулиці; Г – проїзди

На рисунку 4 наведено загальну топологію всіх типів автомобільних доріг міста Кривий Ріг. Топологічний аналіз дозволяє оцінити типи структури міських мереж, їх зв'язність та ієрархічну структуру [29].

Геопросторовий аналіз мережі автомобільних доріг Кривого Рогу продемонстрував, що різні типи автомобільних доріг міста відрізняються за своєю структурою. Так магістральні дороги формують *радіальну* схему, для якої харак-

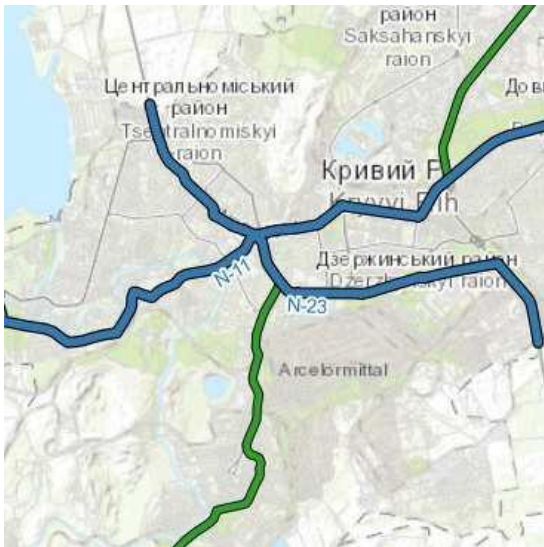
терна мережа доріг у формі радіальних ліній, які розходяться у вигляді променів від трьох центрів (рис. 5А). Вона забезпечує найкоротший зв'язок периферійних районів з центром міста, але, враховуючи велику кількість тран-

зитного вантажного транспорту у напрямках Дніпра, Одеси, Кропивницького та Запоріжжя, це створює суттєву проблему для міста – перевантаженість його центральної частини транзитним рухом.

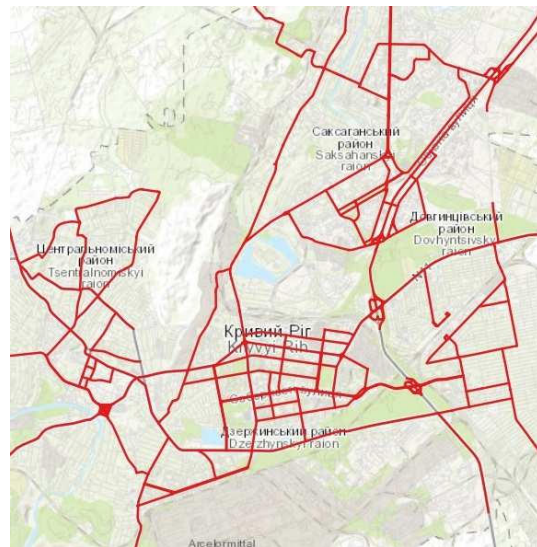
Таблиця 2

Загальна довжина різних типів автомобільних доріг міста Кривий Ріг, та їх щільність

Тип доріг	Довжина, км	Щільність, км / км ²
Магістральні	72,5	0,17
Загальноміські	302,6	0,70
Житлові	2588,9	6,02
Проїзди	664,5	1,55



А



Б



В



Г

Рис. 5. Особливості структури основних типів автомобільних доріг міста Кривий Ріг: А – радіальна схема магістральних доріг; Б – комбінована схема магістральних вулиць загальноміського та районного значення; В – прямокутна схема житлових вулиць; Г – вільна схема проїздів

Магістральні вулиці загальноміського та районного значення формують комбіновану схему і являють собою поєднання декількох структур (рис. 5Б). В її основі радіальна структура, яка розвантажується за допомогою автомобільних доріг у вигляді прямокутних та лі-

нійних структур. Ця схема забезпечує ефективне сполучення як у центрі Кривого Рогу, так і на його периферії. Такий підхід дозволяє максимально врахувати особливості географічного положення, історичного розвитку та сучасних потреб міста при організації руху транспорту

по основних напрямках.

Прямокутна структура вулично-дорожньої міської мережі домінує в організації руху автомобільного транспорту житлових вулиць, особливо новозбудованих мікрорайонів селищної зони міста. Вона побудована за принципом перетину доріг під прямими кутами, формуючи квадрати або прямокутники (рис. 5В). Така структура вважається однією з найзручніших у плануванні міських мереж через її практичність і універсальність.

Для проїздів характерна вільна схема структури з невпорядкованою вулично-дорожньою мережею (рис. 5Г). Для неї властиві вулиці, які можуть мати довільну форму та напрямки, слідуючи природним особливостям ландшафту (річки, пагорби тощо) з частими перетинами, що є серйозною перешкодою для організації руху міського транспорту. Така струк-

тура формується природно, без суворої геометричної організації і характерна переважно для старих забудов міста, відповідно до природних та історичних факторів його розвитку.

Рівень транспортної забезпеченості території традиційно оцінюють за щільністю транспортної мережі. Вона відображає насиченість території міста дорогами та впливає на доступність, мобільність та ефективність транспортної системи [10, 27]. Зазвичай при визначенні щільності дорожньої мережі враховують основні магістральні дороги, а другорядні не приймають до уваги. Тому щільність автомобільних доріг міста Кривий Ріг вивчалась як загалом, так і окремо за типами доріг.

На рисунку 6 наведено карти загальної щільності вулично-дорожньої мережі міста Кривий Ріг, побудовані з використанням методів палетки та інтерполяції методом TIN.

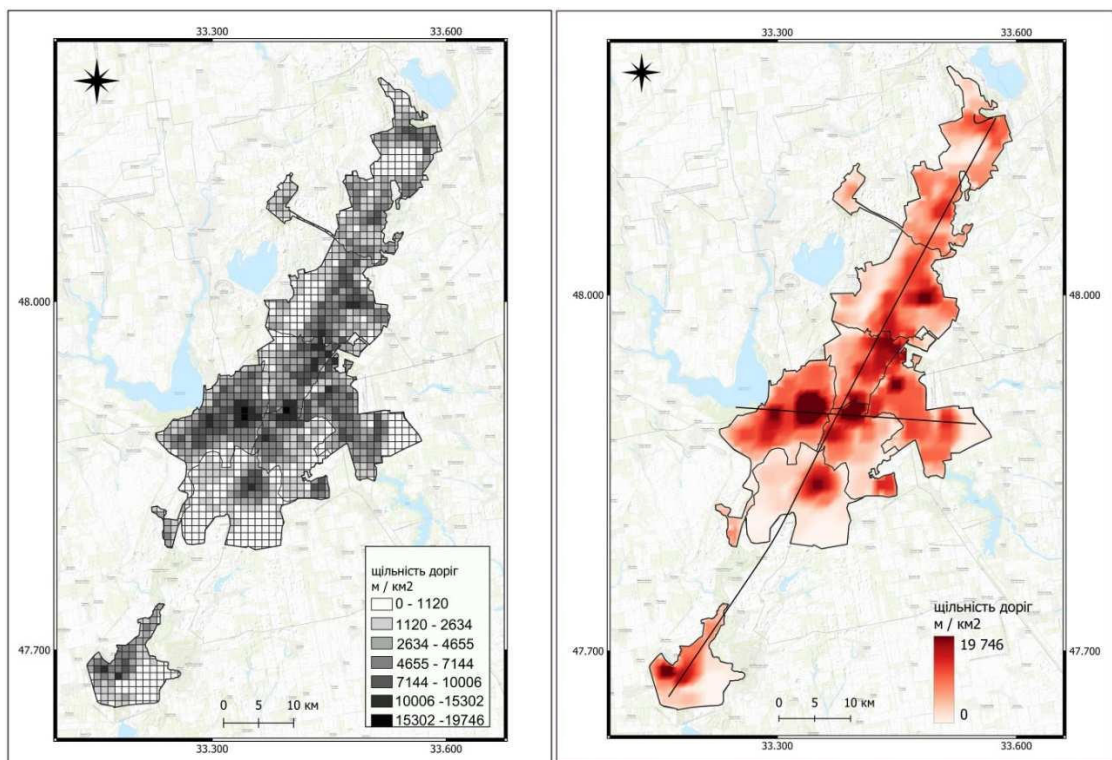


Рис. 6. Карти щільності вулично-дорожньої мережі міста Кривий Ріг (зліва – побудована з використанням методу палетки; справа – методом інтерполяції TIN)

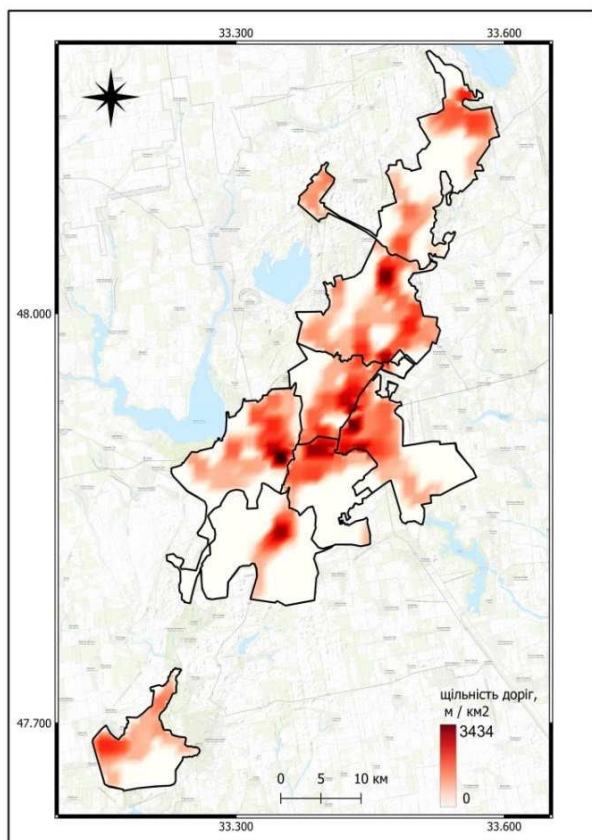
Щільність мережі автомобільних доріг в межах міста змінюється нерівномірно. Найбільша кількість доріг спостерігається вздовж двох умовних осей (вертикальної та горизонтальної), кожна з яких ділить місто, відповідно, на дві частини (див. рис. 6). Ці «гарячі» зони фактично забезпечують більшість внутрішньо міських та транзитних пасажиро- й вантажопотоків. Основа («скелет») цих зон - магістралі та магістральні дороги, на яких покладається головне навантаження руху автотранспорту (рис. 7А). Житлові (рис. 7Б) та проїзні (рис. 7В)

дороги забезпечують взаємозв'язок між магістральними дорогами та їх зв'язок з територіями житлових районів.

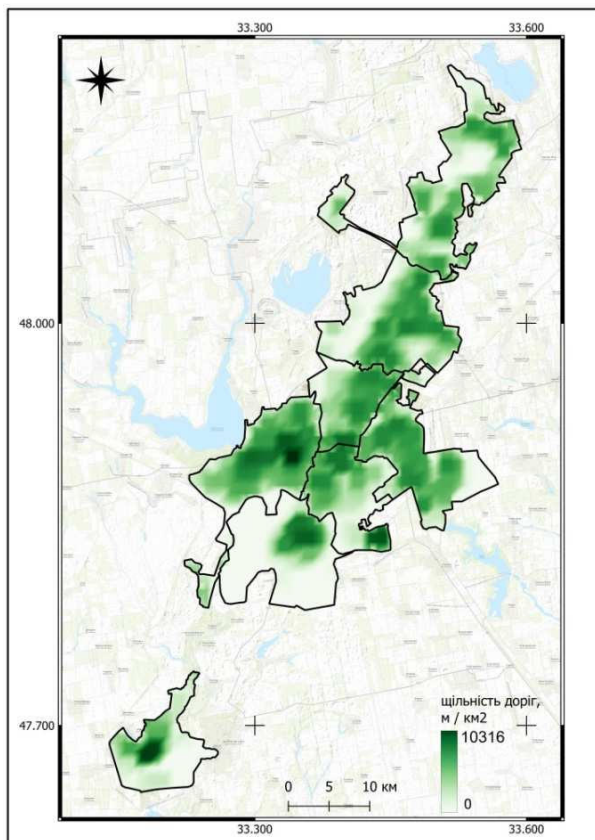
Як результат, карти просторової щільності типів доріг мають подібний вигляд, за деяким виключенням для карти проїзних доріг (дивись рис. 7В). Відмінність останньої – аномально висока щільність проїзних доріг в історичному центрі міста (Центрально-Міський район). Це пов'язано з тим фактом, що більшість будинків та доріг в цій частині побудована на початку 20-го сторіччя за застарілими нормативами і для

забезпечення сучасної пропускної спроможності мережа доповнювалася короткими проїздами. Наслідком цього є суттєве перевантаження

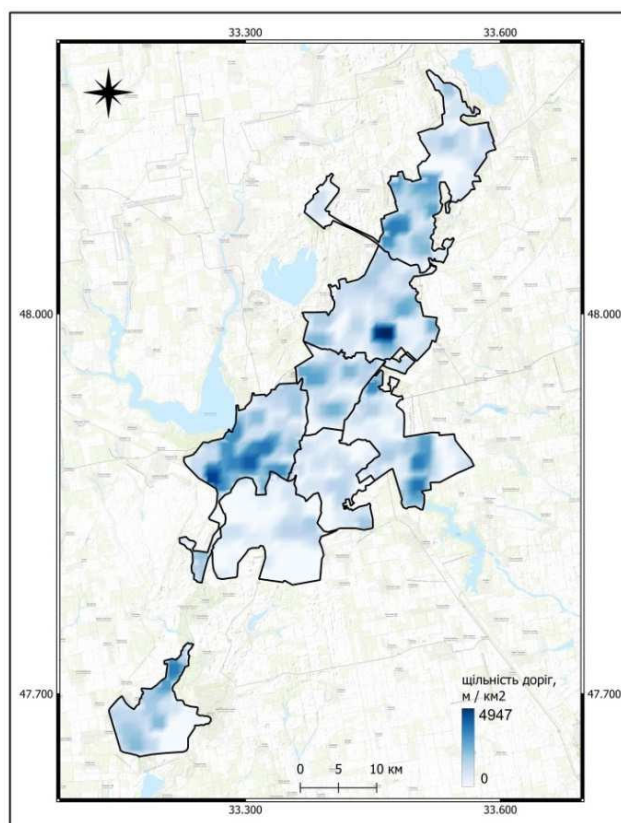
даної ділянки доріг та створення автомобільних заторів.



А



Б



В

Рис. 7. Карти просторової щільності автомобільних доріг різного типу міста Кривий Ріг (побудовано методом інтерполяції TIN):

- А – магістральні та загальноміські;
- Б – житлові;
- В – проїзні

Наступним, дуже важливим показником ефективності мережі є кількість перехресть та транспортних розв'язок. Щільність перехресть у мережі автомобільних доріг міст є ключовим показником, що впливає на ефективність дорожнього руху, мобільність, функціональність, доступність міської інфраструктури та рівень безпеки [4]. Перехрестя є місцями підвищеної

концентрації дорожньо-транспортних пригод та зупинок руху транспортних засобів.

В Кривому Розі перетинання і примикання доріг здійснюються головним чином на одному рівні, за рахунок перехресть (рис. 8). На площу міста 430 км² припадає всього декілька різнорівневих розв'язок.

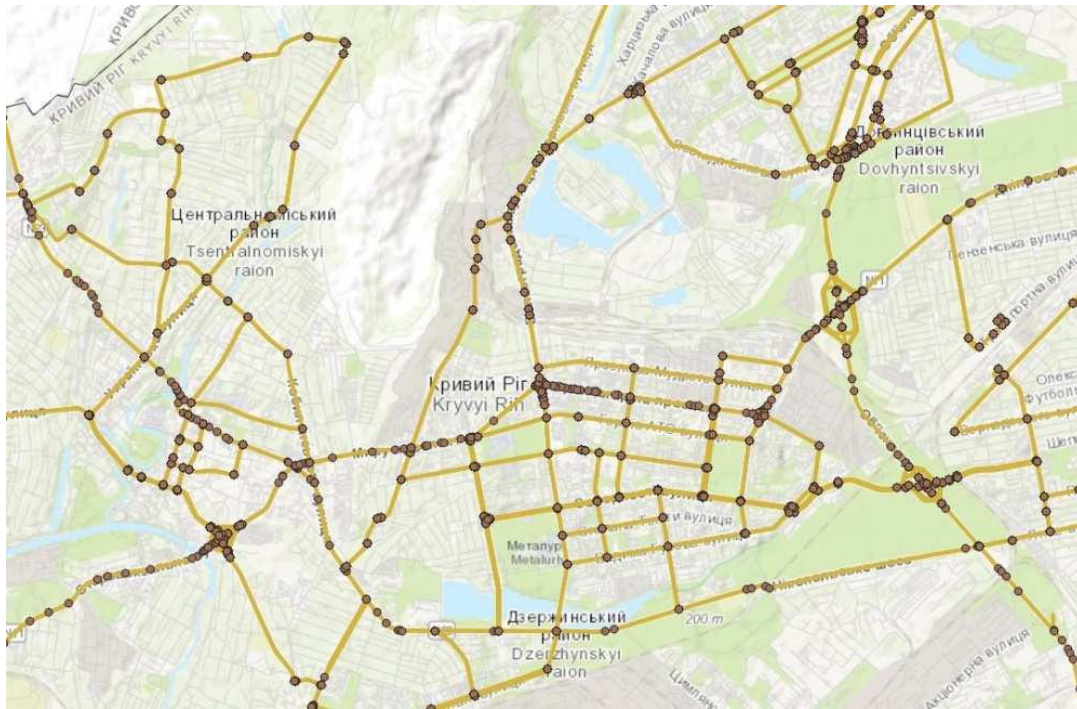


Рис. 8. Фрагмент мережі автомобільних шляхів міста Кривий Ріг з візуалізацією перехресть (побудовано в QGIS)

У зв'язку з цим, аналіз просторової щільності перехресть мережі автомобільних доріг міста має особливе значення. Дослідження показали, що мережа автомобільних доріг міста включає майже 26 тисяч перехресть, що відповідає щільності 60 перехресть на один км². Якщо порівнювати з аналогічними показниками великих міст України, то це майже відповідає щільності перехресть спальних районів Києва (50–80 перехресть/км²) та Одеси (40–60 перехресть/км²). Але в центральних районах цих міст показник щільності перехресть більший в 2-3 рази.

Аналізуючи просторову диференціацію показника щільності перехресть доріг міста Кривий Ріг, слід зазначити суттєву просторову кореляцію його з показником щільності доріг: найбільша кількість перехресть вздовж транспортної осі, яка з'єднує північ і південь міста (рис. 9). Загальна вулично-дорожня мережа відрізняється від мережі магістралей і магістральних вулиць загальноміського та районного значення аномально високою кількістю перехресть в історичному центрі міста. Там відмічається дві «гарячі» зони, які відповідають переважно

перехрестям, сформованими житловими та проїзними дорогами (рис. 10).

Вплив рельєфу на просторову структуру мережі автомобільних доріг міста - ще один важливий аспект, який вимагає дослідження. Рельєф є одним з найважливіших факторів, що впливають на формування просторової структури мережі автомобільних доріг міста. Розуміння цього зв'язку дозволяє створювати більш ефективні, безпечні і екологічні транспортні системи [34].

Кривий Ріг розташований на території з досить складним рельєфом, що характеризується значними перепадами висот, ярами, балками, річковими долинами і, що дуже важливо, кар'єрами та відвалами гірничодобувних підприємств (рис. 11). Такий складний природно-антропогенний характер рельєфу забезпечує його значний вплив на мережу автомобільних доріг міста Кривий Ріг.

Так, численні балки часто використовувалися як природні коридори для прокладання доріг, але також часто створювали бар'єри, що потребували мостових переходів.

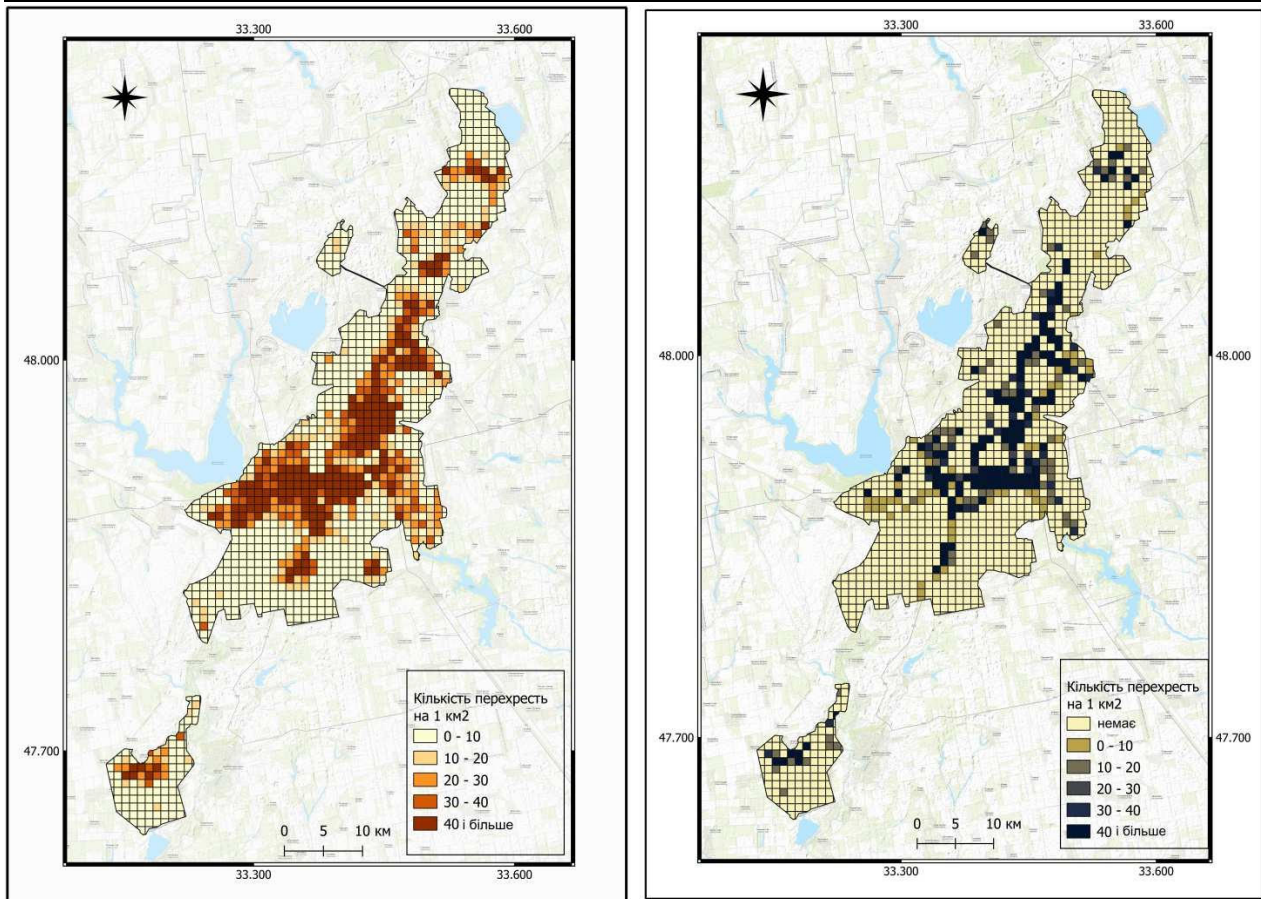


Рис. 9. Щільність автомобільних перехресть у місті Кривий Ріг: зліва – загальна вулично-дорожня мережа; справа – мережа магістралей та магістральних вулиць загальноміського та районного значення



Рис. 10. «Гарячі точки» вулично-дорожньої мережі історичного центру міста Кривий Ріг

Численні кар'єри, відвали та хвостосховища створюють великі промислові зони в межах міста, які є перешкодами для прямого сполучення між районами міста, що призводить до необхідності формування об'їзних шляхів, появи кривих та поворотів, що збільшує довжину маршрутів та час поїздки. Також формування під'їзних шляхів до цих зон вимагає створення окремих транспортних коридорів.

Але при цьому слід відзначити, що, як демонструє карта схилів рельєфу території міста (рис. 11), майже вся мережа доріг міста прокладена на місцевості пологохвилястої рівнини з пологими схилами рельєфу (кут нахилу до 3°). Виключення складають окремі ділянки мережі в зонах перетину крупних балок. Таким чином, вплив рельєфу на мережу автомобільних доріг міста обмежується, переважно, визначенням

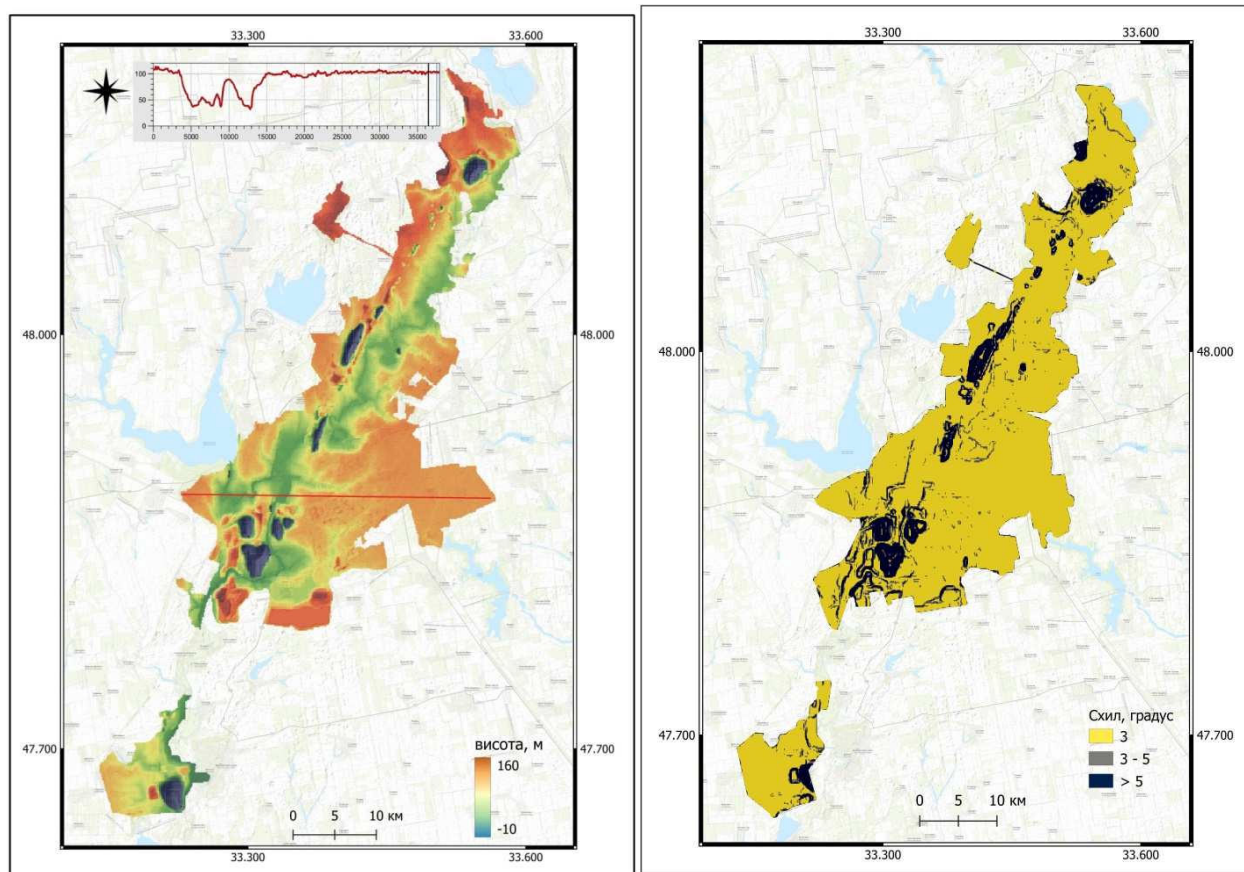


Рис. 11. Цифровий рельєф місцевості (зліва) та карта схилів рельєфу (справа) міста Кривий Ріг

Аналіз автомобільних доріг міста за адміністративними одиницями (районами) підтвердив їх геопросторову неоднорідність (таблиці 3, 4; рис. 12). Так, наприклад, протяжність

доріг в Центрально-Міському районі (754,3 км) понад два рази перевищує довжину доріг Металургійного району (371,2 км).

Таблиця 3

Довжини типів доріг за районами міста Кривий Ріг

Райони	Магістральні	Загальноміські	Житлові	Проїзди	Загалом
Довгинцівський	10,0	47,8	412,8	85,1	555,7
Інгулецький	9,6	39,5	290,2	87,1	426,4
Металургійний	10,4	33,2	293,6	34,0	371,2
Покровський	10,4	60,1	387,2	109,0	566,7
Саксаганський	8,46	41,5	279,0	55,2	384,2
Тернівський	5,8	46,5	393,2	124,9	570,4
Центрально-Міський	18,2	34,0	532,9	169,2	754,3
Загалом:	72,5	302,6	2588,9	664,5	3628,9

Але якщо проаналізувати ці показники за типами доріг (рис. 13), то можна побачити, що така кількісна перевага в довжині доріг у Центрально-Міському районі забезпечується великою протяжністю житлових та проїзних доріг, а частка магістралей та магістральних доріг найбільша у Покровському районі.

Щільність доріг найвища у транзитних районах міста - Центрально-Міському, Сакса-

ганському та Довгинцівському (табл. 4, див. рис. 12), через мережу яких, забезпечується більшість руху транзитного та внутрішньоміського транспорту. Але в списку районів з найвищою щільністю магістралей та магістральних доріг відсутній Центрально-Міський район, що вказує на перевантаження одної з найбільш важливих ділянок міської транспортної мережі міста.

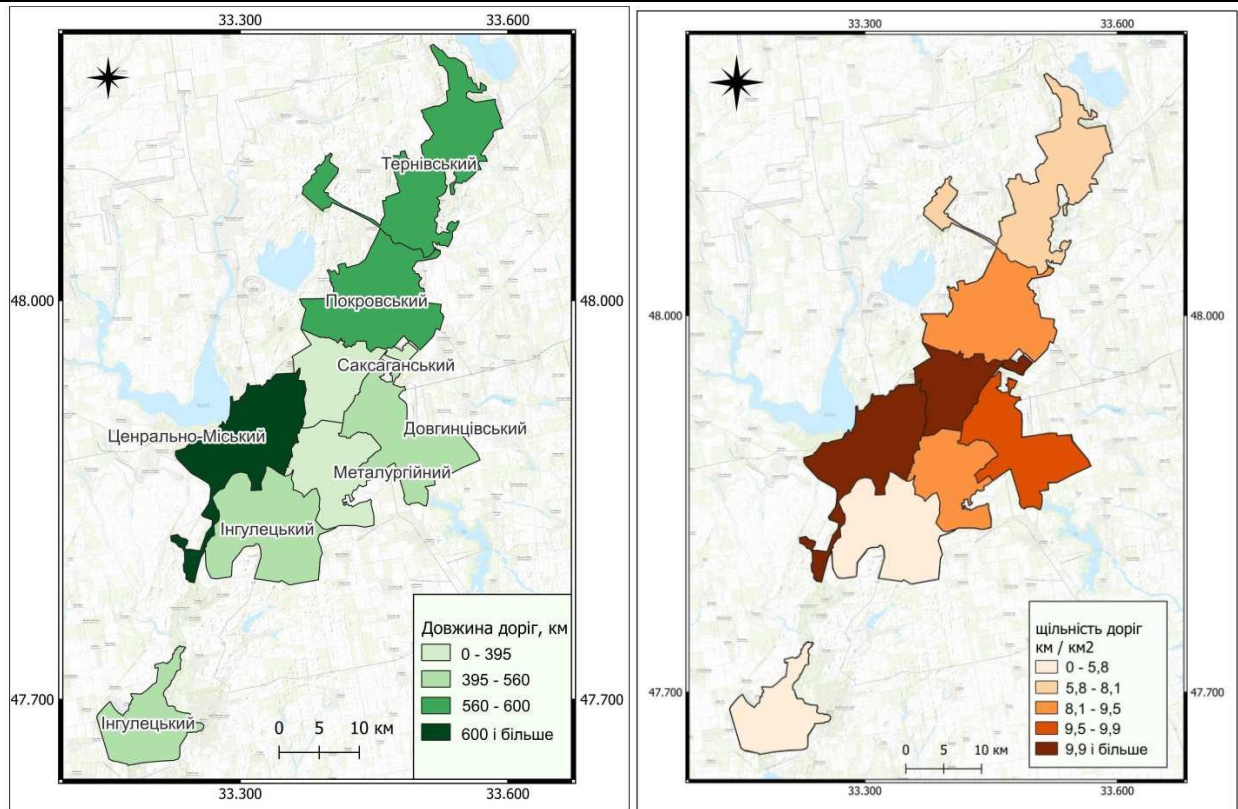


Рис. 12. Хороплетні карти розподілу довжин (зліва) та щільності (справа) вулично-дорожньої мережі міста Кривий Ріг за адміністративними районами

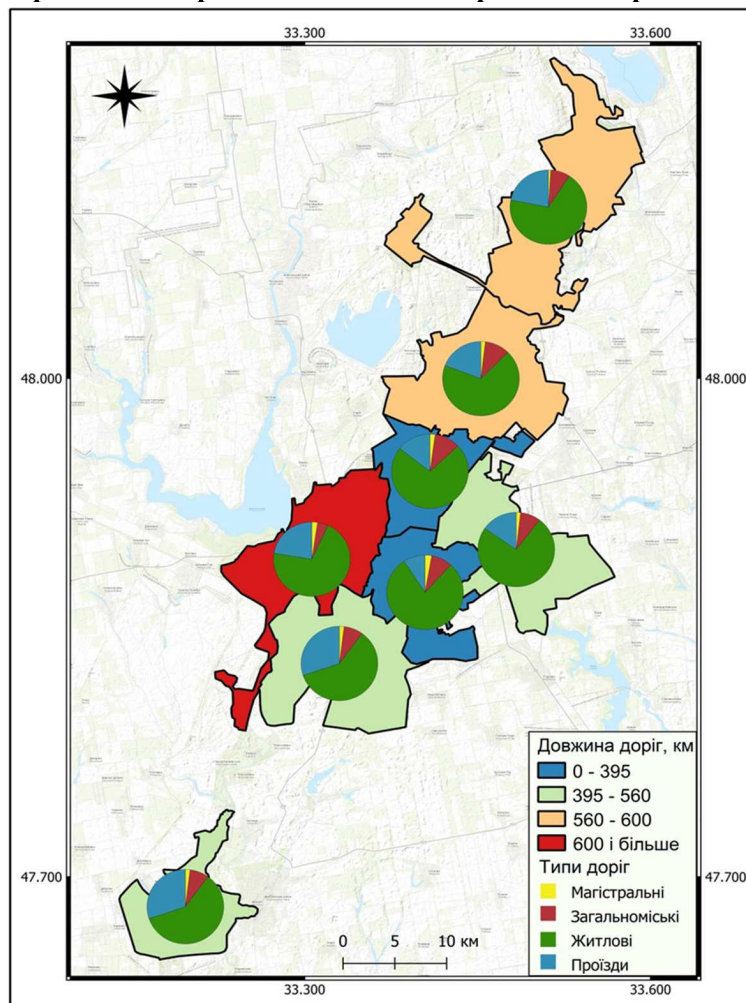


Рис. 13. Карта розподілу довжин доріг різного типу за районами міста Кривий Ріг

Щільність типів доріг за районами міста Кривий Ріг

Райони	Магістральні	Загальнономіські	Житлові	Проїзди	Загалом
Довгинцівський	0,18	0,85	7,35	1,51	9,89
Інгулецький	0,12	0,48	3,54	1,06	5,25
Металургійний	0,23	0,75	6,55	0,76	8,29
Покровський	0,17	0,98	6,31	1,78	9,23
Саксаганський	0,22	1,07	7,21	1,43	9,93
Тернівський	0,07	0,60	5,05	1,99	7,33
Центрально-Міський	0,26	0,49	7,70	2,45	10,90

Найбільш віддаленні від центру райони – Інгулецький та Тернівський, мають найнижчі (майже в два рази) показники як загальної щільності, так і щільності магістралей та магістральних доріг.

Слід зазначити, що дуже подібна картина відмічається і за показниками кількості та щільності перехресть в мережі автомобільних доріг міста (табл. 5, рис. 14, 15).

Таблиця 5

Показники кількості та щільності перехресть мережі автомобільних доріг за районами міста Кривий Ріг

№	Райони	Кількість перехресть	Щільність перехресть, одиниць/км²
1	Довгинцівський	3158	59,5
2	Інгулецький	2241	21,3
3	Металургійний	3224	62,1
4	Покровський	3658	61,5
5	Саксаганський	3581	91,4
6	Тернівський	2858	37,5
7	Центрально-Міський	6852	103,2

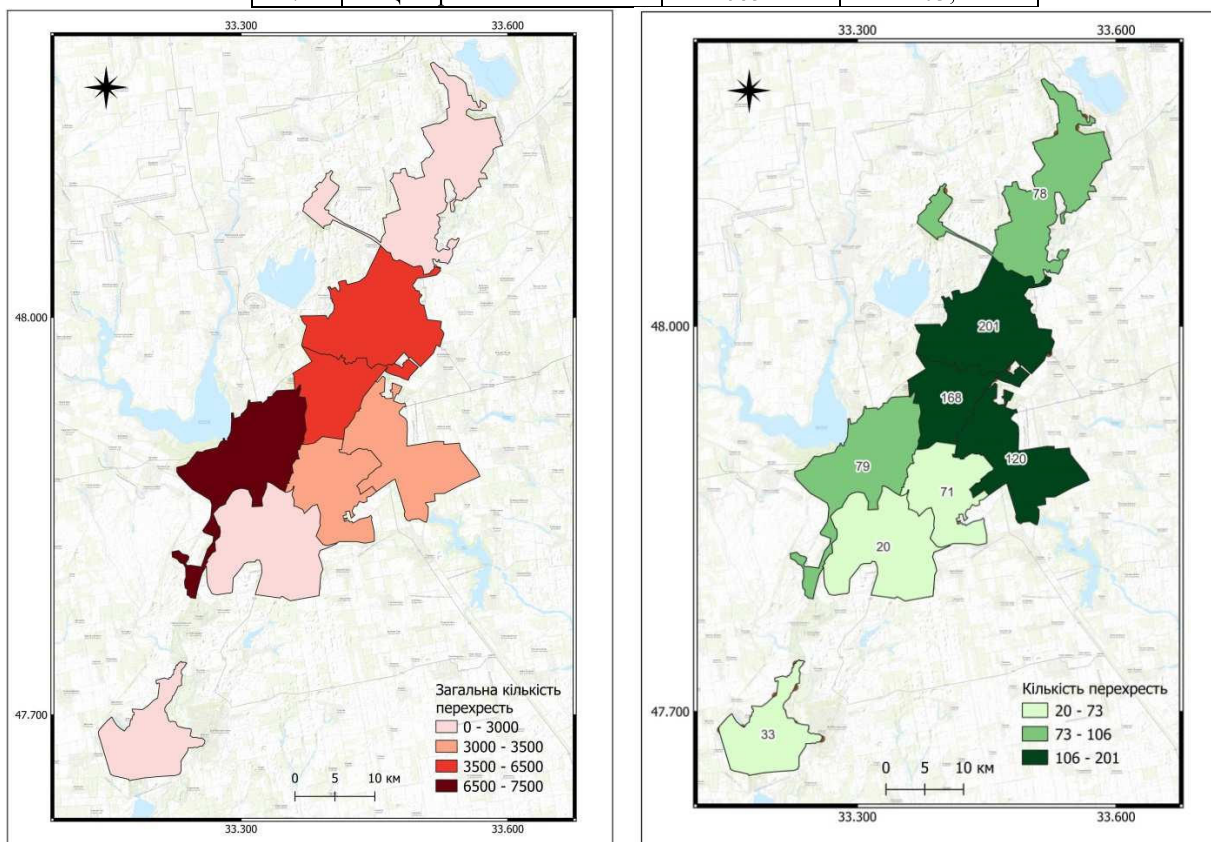


Рис. 14. Хоролетні карти кількості автомобільних перехресть за районами міста Кривий Ріг: зліва – загальна вулично-дорожня мережа; справа – магістральні вулиці загальнономіського та районного значення

Найбільша кількість перехресть в Центральній-Міському, Покровському та Саксаганському районах, при мінімальній кількості в Тернівському та Інгулецькому. А найбільша кількість перехресть магістралей та магістральних доріг в Покровському, Саксаганському та

Довгинцівському районах (рис. 14). Мінімальна кількість перехресть в Інгулецькому та Тернівському районах міста. Майже повторюють ці тенденції і показники щільності перехресть мережі автомобільних доріг міста (рис. 15).

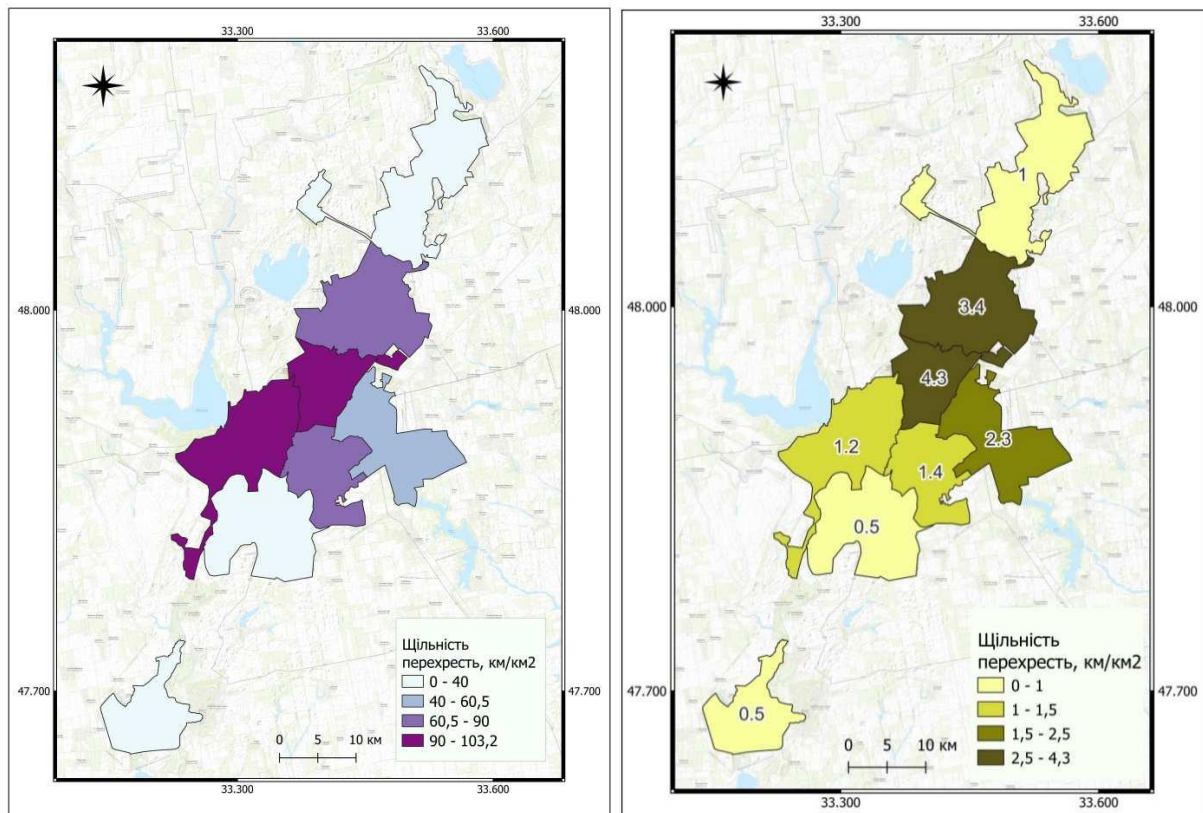


Рис. 15. Хороплетні карти щільності автомобільних перехресть за районами міста Кривий Ріг: зліва – загальна вулично-дорожня мережа; справа – магістральні вулиці загальноміського та районного значення

Висновки. Геопросторовий аналіз відіграє важливу роль в пошуках та обґрунтуванні засобів вирішення проблем міської транспортної комунікації. В ході дослідження було встановлено таке.

1. Розвиток мережі автомобільних доріг міста Кривий Ріг відстає від його реальних потреб. На сьогодні мережа неспроможна одночасно й ефективно пропускати таку кількість транспортних засобів, які є в місті.
2. Виявлено нерівномірність розвитку мережі доріг та її топології на території міста, яка нерідко не відповідає динамічним можливостям і напрямкам переважного руху внутрішньоміського та транзитного транспорту.
3. Відсутність достатньої кількості альтернативних шляхів для з'єднання вузлів магістралей і магістральних доріг, характеризує мережу як таку, що має низький рівень редувантності. Це насамперед стосується руху транзитного транспорту, більшість якого рухається через центральні райони міста.

4. Вплив природно-антропогенного рельєфу на мережу автомобільних доріг міста обмежується, переважно, визначенням напрямків магістралей та магістральних доріг. Але у зв'язку зі зменшенням техногенного навантаження на території міста (результат часткового скорочення промислового виробництва) стає можливим використання закритих промислових зон, що може суттєво спростити мережу магістральних доріг.
5. Між віддаленими районами міста існує недостатня кількість транспортних зв'язків (об'їзних доріг), що суттєво перевантажує центральні магістральні дороги.
6. Отримані результати дозволяють формувати конкретні заходи щодо покращення ефективності автотранспортної мережі, зокрема, в контексті сталого розвитку міста.

Перспективи використання результатів дослідження. Для отримання більш повної інформації стосовно просторової організації мережі автомобільних доріг міста Кривий Ріг планується продовження досліджень в напрям-

ку вивчення їх пропускної здатності з урахуванням стану, інтенсивності руху, щільності населення тощо.

Література:

1. Баранський Ю.М., Пугач С.О. Просторовий аналіз транспортної доступності територій у межах міста Луцька. *Економічні науки: збірник наук. праць Луцького національного технічного університету. Серія «Регіональна економіка»*. 2016. С. 35-45.
2. Вдовенко В. В., Веклич Л. М. Картографування транспортної мережі України. *Вісник геодезії та картографії*. 2014, № 2: С. 33-34.
3. Державні будівельні норми України планування і забудова територій ДБН Б.2.2-12:2018. Київ. Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2018 р. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3260441209981634046?doc_type=2
4. Дахмані М. Вулично-шляхові мережі міст та їх елементи: особливості організації. *Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ»*. Луцьк. 2022. №73. С. 40-46. DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.5.
5. Закон України № 2862-IV «Про автомобільні дороги». Відомості Верховної Ради України (ВВР), 2005, № 51, 556 с.
6. Зацерковний В. І., Тишаєв І. В., О. В. Кобрін. Побудова моделі транспортно-дорожньої мережі Чернігівської області за допомогою геоінформаційних технологій. *Наукові технології*. Вип. 2. 2016. С.162-168.
7. Першаков В.М., Белятинський А.О., Степанчук О.В., Кротов Р.В. Дослідження транспортних потоків в аспекті заторових станів дорожнього руху: Монографія. К.: НАУ, 2015. 177 с.
8. Рудакевич І. Р. Картографічне моделювання транспортних потоків у місті Тернопіль. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*, 44 (1), 2018. С. 71-80.
9. Санько Я. В., Ройко Ю.Я. Дослідження впливу довжини ділянки вулично-дорожньої мережі на характеристики транспортних потоків. *Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки»*. 2012. Вип. 37. С.289-293.
10. Скорчук М.П. Дослідження впливу щільності мережі автомобільних доріг на ефективність функціонування транспортних систем. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Науковий журнал. Луцьк: Луцький НТУ, 2017. №2 (9). С. 153 - 159.
11. Тимошук О.Ю., Рахуба О.І. Впровадження геоінформаційних технологій для удосконалення процесу управління автомобільними дорогами. *Автомобільні дороги*. 2015. № 5 (247). С. 44 - 46.
12. Ткаченко І.В., Бризгалін І.С., Козлов В.В. Особливості створення баз даних автомобільних доріг з застосуванням геоінформаційних технологій. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві: збірник наукових праць*. Луцьк: ЛНТУ, 2017. Вип. 6. С. 268 – 274.
13. Холошин І.В., Бондаренко О.В., Ганчук О.В., Варфоломєєва І.М. Практикум з цифрової картографії: навчальний посібник. Прага. Oktan Print, 2023. 174 с.
14. Холошин І., Сивий М., Пантелєєва Н., Ганчук О. Геопросторовий моніторинг мережі автомобільних доріг Дніпропетровської області. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*. Том 56 № 1 (2024). С. 77-88. DOI:<https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.10>
15. Afshin Shariat Mohaymany, Matin Shahri, Babak Mirbagheri GIS-based method for detecting high-crash-risk road segments using network kernel density estimation. *Geo-spatial Information Science*, 16:2, 2013. P. 113-119, DOI: 10.1080/10095020.2013.766396.
16. Angel S.; Parent J.; Civco D.L.; Blei A.; Potere D. The dimensions of global urban expansion // Estimates and projections for all countries, 2000-2050. *Prog. Plan.* 2011. 75. P. 53–107.
17. Bo Liu, Yu Shi, Da-Jun Li, Yan-Dong Wang An Economic Development Evaluation Based on the OpenStreetMap Road Network Density: The Case Study of 85 Cities in China. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2020, 9, 517; doi:10.3390/ijgi9090517.
18. Chen M.; Wu F.; Yin M.; Xu J. Impact of Road Network Topology on Public Transportation Development. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* Volume 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6209592>.
19. Erath A, Lochl M. and Axhausen K. Graph-Theoretical Analysis of the Swiss Road and Railway Networks over Time, *Networks and Spatial Economics*, 2009, 9 (3), P. 379 - 400.
20. Gastner M., Newman M. The Spatial Structure of Networks. *The European Physical Journal*. 2006, 49 (2), P. 247-252.
21. Grytsevych V. S., Podvirna, K. Y., & Senkiv, M. I. (2019). Motor transport network in the Western region of Ukraine as a factor of tourism industry development. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"* (50), p.91-100. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-07>
22. Jiang B., & Claramunt, C. Topological Analysis of Urban Street Networks. *Environment and Planning. Planning and Design*, 2004. 31(1), 151-162. <https://doi.org/10.1068/b306>.
23. Hongxing Deng, Wen Wen, Wenhui Zhang Analysis of Road Networks Features of Urban Municipal. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2023, 12, 188. <https://doi.org/10.3390/ijgi12050188>.
24. Karpinski M.; Kuznichenko S.; Kazakova N.; Frazee-Frazenko O. Jancarczyk D. Geospatial Assessment of the Territorial Road Network by Fractal Method. *Future Internet* 2020. 12. 201. <https://doi.org/10.3390/fi12110201/>.
25. Kholoshyn I.; Mantulenko S.; Burman L.; Joyce S. (2022). Territorial assessment of the ecological and social comfort of the population living environment of large industrial cities (by the example of Kryvyi Rih. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 1049 012075. DOI 10.1088/1755-1315/1049/1/012075.
26. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., & Rhind, D. W. (2015). *Geographic information science and systems*. John Wiley & Sons. 460 p.
27. Ma Q. Huang G., Tang X. GIS-based analysis of spatial–temporal correlations of urban traffic accidents, *Eur. Transp. Res. Rev.* 13. 2021. P. 1–11.
28. Malenkovska M., Donceva R., Bunevska-Talevska J. (2009). Role of functional classification of highways in road traffic safety. *Transport Problems : an International Scientific Journal*. 4(3 part 1). 8 p.
29. Marshall S. (2004). *Streets and Patterns* (1st ed.). Routledge. 336 p. <https://doi.org/10.4324/9780203589397>
30. Mengistie, B.M., Shi, W., Wong, M.S. *et al.* Urban street network and data science based spatial connectivity evaluation of African cities: implications for sustainable urban development. *GeoJournal* 88, 4753–4766 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10708-023-10887-6>

31. Pradip Debnath A QGIS-Based Road Network Analysis for Sustainable Road Network Infrastructure: An Application to the Cachar District in Assam, India. *Infrastructures* 2022, 7, 114. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7090114>.
32. Rodrigue J.P. *The Geography of Transport Systems*. New York: Routledge, 2020. 456 p. doi.org/10.4324/9780429346323.
33. Sehra S.S., Singh J., Sehra S.K. et al. Extending QGIS processing toolbox for assessing the geometrical properties of OpenStreetMap data. *Spat. Inf. Res.* 31. P. 135–144 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41324-022-00480-3>.
34. Tkachenko I., Pavlenko T., Lytvynenko T. et al. *Street and Urban Road Network Geospatial Analysis: Case Study of the Poltava City, Ukraine*. Smart Technologies in Urban Engineering. 2023.
35. Sreelekha M. G., K. Krishnamurthy and M. V. L. R. Anjaneyulu. "Interaction between road network connectivity and spatial pattern. *Procedia technology* 24 (2016): 131-139.
36. Wang, Junyi. Using network analysis to explore the effects of road network on traffic congestion and retail store sales. MS thesis. University of Waterloo, 2017. <http://hdl.handle.net/10012/11716>
37. Wen W.; Zhang W.; Deng H. Research on Urban Road Network Evaluation Based on Fractal Analysis. *J. Adv. Transp.* 2023, Volume 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/9938001>
38. Xie F. *The Evolution of Road Networks : A Simulation Study Based on Network Degeneration*, Master's thesis, Department of Civil Engineerig, University of Minnesota, Minneapolis, MN, 2005. 97 p.
39. Xie F., Levinson D. Measuring the Structure of Road Networks. *Geographical Analysis*, 2007. 39 (3). P. 336-356.
40. Zhang Q.; Wang J.; Peng X.; Gong P.; Shi P. Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multi-temporal Landsat TM data. *Int. J. Remote Sens.* 2002. 23. 3057-3078.
41. Zhao Guoliang, Xinqi Zheng, Zhiyuan Yuan, and Lulu Zhang. Spatial and Temporal Characteristics of Road Networks and Urban Expansion. *Land*. 2017. 6. <https://doi.org/10.3390/land6020030>

References:

1. Baranskyi Yu.M., Puhach S.O. *Prostorovyi analiz transportnoi dostupnosti terytorii u mezhakh mista Lutska*. Ekonomichni nauky: zbirnyk nauk. prats Luts'koho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya «Rehionalna ekonomika». 2016. S. 35-45.
2. Vdovenko V. V., Veklych L. M. *Kartohrafuvannia transportnoi merezhi Ukrainy*. Visnyk heodezii ta kartohrafii, 2014, № 2: S. 33-34.
3. Derzhavni budivelni normy Ukrainy planuvannia i zabudova terytorii DBN B.2.2-12:2018. Kyiv. Ministerstvo rehionalnoho rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnoho hospodarstva Ukrainy. 2018 r. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3260441209981634046?doc_type=2
4. Dakhmani M. Vulychno-shliakhovi merezhi mist ta yikh elementy: osoblyvosti orhanizatsii. Mizhvuzivskyi zbirnyk «NAUKOVI NOTATKY». Luts'k. 2022. №73. S. 40-46. DOI 10.36910/775.24153966.2022.73.5.
5. Zakon Ukrainy № 2862-IV «Pro avtomobilni dorohy». Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR), 2005, № 51, 556 s.
6. Zatserkovnyi V. I., Tishaiev I. V., O. V. Kobrin. Pobudova modeli transportno-dorozhnoi merezhi Chernihivskoi oblasti za dopomohoiu heoinformatsiinykh tekhnolohii. Naukoiemni tekhnolohii. Vyp. 2. 2016. C.162-168.
7. Pershakov V.M., Bieliatynskyi A.O., Stepanchuk O.V., Krotov R.V. *Doslidzhennia transportnykh potokiv v aspekti zatorovykh staniv dorozhnogo rukhu: Monohrafiia*. K.: NAU, 2015. 177 s.
8. Rudakevych I. R. Kartohrafichne modeliuvannia transportnykh potokiv u misti Ternopi. Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriya: heohrafiia, 44(1), 2018. S. 71-80.
9. Sanko Ya. V., Roiko Yu.Ia. Doslidzhennia vplyvu dozhyzny dilianky vulychno-dorozhnoi merezhi na kharakterystyky transportnykh potokiv. Mizhvuzivskyi zbirnyk naukovykh prats «Naukovi notatky». 2012. Vyp. 37. S.289-293.
10. Skochuk M.P. Doslidzhennia vplyvu shchilnosti merezhi avtomobilnykh dorih na efektyvnist funktsionuvannia transportnykh system. Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti. Naukovi zhurnal. Luts'k: Luts'kyi NTU, 2017. №2(9). S. 153 - 159.
11. Tymoshchuk O.Iu., Rakhuba O.I. Vprovadzhennia heoinformatsiinykh tekhnolohii dlia udoskonalennia protsesu upravlinnia avtomobilnymy dorohamy. *Avtomobilni dorohy*. 2015. № 5 (247). S. 44 - 46.
12. Tkachenko I.V., Bryzghalin I.S., Kozlov V.V. Osoblyvosti stvorennia baz danykh avtomobilnykh dorih z zastosuvanniam heoinformatsiinykh tekhnolohii. Suchasni tekhnolohii ta metody rozrakhunkiv u budivnytstvi: zbirnyk naukovykh prats. Luts'k: LNTU, 2017. Vyp. 6. S. 268 – 274.
13. Kholoshyn I.V., Bondarenko O.V., Hanchuk O.V., Varfolomicieva I.M. *Praktykum z tsyfrovoi kartohrafii: navchalnyi posibnyk*. Praha. Oktan Print, 2023. 174 c.
14. Kholoshyn I., Syvyi M., Pantelieieva N., Hanchuk O. Heoprostorovi monitorynh merezhi avtomobilnykh dorih Dnipropetrovskoi oblasti. Naukovi zapysky Ternopil'skoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Volodymyra Hnatiuka. Seriya: heohrafiia. Tom 56 № 1 (2024). S. 77-88. DOI:<https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.10>
15. Afshin Shariat Mohaymany, Matin Shahri, Babak Mirbagheri GIS-based method for detecting high-crash-risk road segments using network kernel density estimation, *Geo-spatial Information Science*, 16:2, 2013. P. 113-119, DOI: 10.1080/10095020.2013.766396.
16. Angel S.; Parent J.; Civco D.L.; Blei A.; Potere D. The dimensions of global urban expansion. Estimates and projections for all countries, 2000-2050. *Prog. Plan.* 2011. 75. P. 53–107.
17. Bo Liu, Yu Shi, Da-Jun Li, Yan-Dong Wang An Economic Development Evaluation Based on the OpenStreetMap Road Network Density: The Case Study of 85 Cities in China. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2020, 9, 517; doi:10.3390/ijgi9090517.
18. Chen M.; Wu F.; Yin M.; Xu J. Impact of Road Network Topology on Public Transportation Development. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* Volume 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/6209592>.
19. Erath A, Lochl M. and Axhausen K. Graph-Theoretical Analysis of the Swiss Road and Railway Networks over Time, *Networks and Spatial Economics*, 2009, 9 (3), P. 379 - 400.
20. Gastner M., Newman M. The Spatial Structure of Networks. *The European Physical Journal*. 2006, 49 (2), P. 247-252.
21. Grytsevych V. S., Podvirna, K. Y., & Senkiv, M. I. (2019). Motor transport network in the Western region of Ukraine as a factor of tourism industry development. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"* (50), p.91-100. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-07>
22. Jiang B., & Claramunt, C. Topological Analysis of Urban Street Networks. *Environment and Planning B // Planning and Design*, 2004. 31(1), 151-162. <https://doi.org/10.1068/b306>.

23. Hongxing Deng, Wen Wen, Wenhui Zhang Analysis of Road Networks Features of Urban Municipal. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2023, 12, 188. <https://doi.org/10.3390/ijgi12050188>.
24. Karpinski M.; Kuznichenko S.; Kazakova N.; Frazee-Frazenko O. Jancarczyk D. Geospatial Assessment of the Territorial Road Network by Fractal Method. Future Internet 2020. 12. 201. <https://doi.org/10.3390/fi12110201/>.
25. Kholoshyn I.; Mantulenko S.; Burman L.; Joyce S. (2022). Territorial assessment of the ecological and social comfort of the population living environment of large industrial cities (by the example of Kryvyi Rih. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1049 012075. DOI 10.1088/1755-1315/1049/1/012075.
26. Longley P. A., Goodchild M. F., Maguire D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic information science and systems. John Wiley & Sons. 460 p.
27. Ma Q. Huang G., Tang X. GIS-based analysis of spatial–temporal correlations of urban traffic accidents, Eur. Transp. Res. Rev. 13. 2021. P. 1–11.
28. Malenkovska M., Donceva R., Bunevska-Talevska J. (2009). Role of functional classification of highways in road traffic safety. Transport Problems : an International Scientific Journal. 4 (3 part 1). 8 p.
29. Marshall S. (2004). Streets and Patterns (1st ed.). Routledge. 336 p. <https://doi.org/10.4324/9780203589397>
30. Mengistie, B.M., Shi, W., Wong, M.S. *et al.* Urban street network and data science based spatial connectivity evaluation of African cities: implications for sustainable urban development. *GeoJournal* **88**, 4753–4766 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10708-023-10887-6>
31. Pradip Debnath A QGIS-Based Road Network Analysis for Sustainable Road Network Infrastructure: An Application to the Cachar District in Assam, India. *Infrastructures* 2022, 7, 114. <https://doi.org/10.3390/infrastructures7090114>.
32. Rodrigue J P. The Geography of Transport Systems. New York: Routledge, 2020. 456 p. doi.org/10.4324/9780429346323.
33. Sehra S.S., Singh J., Sehra S.K. *et al.* Extending QGIS processing toolbox for assessing the geometrical properties of OpenStreetMap data. *Spat. Inf. Res.* 31. P. 135–144 (2023). <https://doi.org/10.1007/s41324-022-00480-3>.
34. Tkachenko I., Pavlenko T., Lytvynenko T. *et al.* Street and Urban Road Network Geospatial Analysis: Case Study of the Poltava City, Ukraine. *Smart Technologies in Urban Engineering*. 2023.
35. Sreelekha M. G., K. Krishnamurthy and M. V. L. R. Anjaneyulu. "Interaction between road network connectivity and spatial pattern. *Procedia technology* 24 (2016): 131-139.
36. Wang, Junyi. Using network analysis to explore the effects of road network on traffic congestion and retail store sales. MS thesis. University of Waterloo, 2017. <http://hdl.handle.net/10012/11716>
37. Wen W.; Zhang W.; Deng H. Research on Urban Road Network Evaluation Based on Fractal Analysis. *J. Adv. Transp.* 2023, Volume 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/9938001>
38. Xie F. The Evolution of Road Networks : A Simulation Study Based on Network Degeneration, Master's thesis, Department of Civil Engineerig, University of Minnesota, Minneapolis, MN, 2005. 97 p.
39. Xie F., Levinson D. Measuring the Structure of Road Networks. *Geographical Analysis*, 2007. 39 (3). P. 336-356.
40. Zhang Q.; Wang J.; Peng X.; Gong P.; Shi P. Urban built-up land change detection with road density and spectral information from multi-temporal Landsat TM data. *Int. J. Remote Sens.* 2002. 23. 3057-3078.
41. Zhao Guoliang, Xinqi Zheng, Zhiyuan Yuan, and Lulu Zhang. Spatial and Temporal Characteristics of Road Networks and Urban Expansion. *Land*. 2017. 6. <https://doi.org/10.3390/land6020030>

Надійшла до редакції 26. 03. 2025 р.