
КАРТОГРАФО-ГЕОГРАФІЧНИЙ АНАЛІЗ ТРАНСПОРТНОЇ ДОСТУПНОСТІ ЦЕНТРІВ ГРОМАД СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ НА ОСНОВІ ТЕОРІЇ ГРАФІВ

Корнус А. О.

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-596-9-14>

ВСТУП

Транспортну доступність слід розглядати не лише як важливу властивість транспортної інфраструктури, але й як специфічний територіальний ресурс, як одну з важливих умов розвитку економіки на даній території¹. Вона визначає рівень зв'язності населених пунктів, доступ до адміністративних, освітніх, медичних та економічних центрів, а також загальну ефективність транспортної мережі. Для регіонів із відносно низькою щільністю населення та нерівномірним розташуванням інфраструктурних об'єктів ця проблема набуває особливої актуальності.

Сумська область, розташована на північному сході України, має складну транспортну структуру, що сформувалася під впливом як природних факторів (річкова мережа, лісостеповий ландшафт), так і історичного розвитку населених пунктів. В умовах адміністративно-територіальної реформи, яка передбачає укрупнення громад і зміну підходів до просторового планування, оцінка транспортної доступності стає важливим інструментом для прийняття управлінських рішень.

Актуальність дослідження транспортної доступності Сумської області також зумовлена необхідністю оцінки просторової справедливості в розподілі ресурсів та послуг. Нерівномірна доступність може спричинити економічну стагнацію окремих територій, зниження мобільності населення та соціальну «ізоляцію» малих населених пунктів. Аналіз транспортної мережі за допомогою методів теорії графів та ізохронного моделювання дозволяє об'єктивно оцінити ситуацію, виявити слабкі місця в інфраструктурі та сформулювати пропозиції щодо її оптимізації.

¹ Підгрушній Г. П. та ін. Інтегральний потенціал території – теоретичні та практичні аспекти дослідження: монографія. К.: Ін-т географії НАН України. 2012. 464 с.

Отже, дослідження транспортної доступності районних центрів та центрів територіальних громад Сумської області не лише має наукове значення, а й може стати основою для планування транспортної політики, удосконалення логістичних зв'язків та підвищення рівня просторової інтеграції регіону.

1. Аналіз існуючих підходів та методик оцінки транспортної доступності

У регіональному транспортному плануванні та моделюванні показники доступності традиційно відіграють ключову роль. Однак сучасні виклики вимагають розробки нових методологічних підходів, які забезпечують високу ефективність, мультимасштабність, прозорість і можливість адаптації, використовуючи відкриті та неоднорідні джерела даних про транспортні мережі з точною просторовою деталізацією на великих географічних територіях. У роботі С. Д. Бланшард та ін. представлено “UrbanAccess” – інструмент з відкритим вихідним кодом, що використовує узагальнену та масштабовану методологію для оцінки транспортної доступності². UrbanAccess дозволяє аналізувати мультимодальні мережі, інтегруючи пішохідну інфраструктуру та громадський транспорт із розкладним функціонуванням у високій просторовій роздільній здатності в межах мегаполісів.

Дослідження Дж. Парк підкреслює важливість просторової доступності для формування місцевої політики у галузі транспортного обслуговування, оскільки вона дозволяє виявляти територіальні диспропорції та сприяти ефективному розміщенню інфраструктури³. Автори аналізують методологічні вдосконалення у вимірюванні доступності та виділяють два ключові тренди досліджень: мультимодальну доступність і часові зміни просторової доступності. Робота акцентує на необхідності глибшого залучення географів до інтеграції динамічних даних і посилення впливу аналізу доступності на прийняття рішень.

Оригінальним прикладом геоінформаційного картографування транспортної доступності є «TUM Accessibility Atlas» Мюнхенської агломерації⁴, зосереджений на вирішенні проблем доступності

² Blanchard S. D., Waddell P. UrbanAccess: generalized methodology for measuring regional accessibility with an integrated pedestrian and transit network. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 2017. 2653(1). P. 35-44.

³ Park J., Goldberg D. W. A Review of Recent Spatial Accessibility Studies That Benefitted from Advanced Geospatial Information: Multimodal Transportation and Spatiotemporal Disaggregation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. 10(8). 532.

⁴ Büttner B., Kinigadner J., Ji C. et al. The TUM Accessibility Atlas: Visualizing Spatial and Socioeconomic Disparities in Accessibility to Support Regional Land-Use and Transport Planning. *Netw. Spat. Econ.* 2018. 18.-P. 385-414.

транспорту та землекористування в умовах швидкого зростання населення. Атлас інтегрує різноманітні наукові методи вимірювання доступності, включаючи багатомодальну транспортну мережу та структурні дані про землекористування. Метою інструменту є візуалізація просторових і соціо-економічних диспропорцій, сприяння кращому плануванню та розвитку регіону, а також створення спільної мови серед зацікавлених сторін для вирішення проблем сталого розвитку.

Б. Поудьял та ін.⁵ розробляють новий метод для вимірювання циркуляційності доступності, що враховує ефективність вулиць за типами міських об'єктів. На відміну від традиційних методів, які оцінюють доступність лише через близькість об'єктів або щільність транспорту, новий показник «pairwise circuitry» (PC) вимірює надмірні витрати на подорож, що виникають через структуру вуличної мережі. Цей підхід дозволяє врахувати як просторові, так і топологічні кореляції між об'єктами, що робить метод гнучким для різних застосувань і порівняльних аналізів.

У дослідженні С. Гаштархані та ін.⁶ розглядається важлива проблема просторової доступності медичних послуг шляхом розробки геообробного інструментарію для ArcGIS Pro, який реалізує як класичну, так і розширену версію методу двоетапної плаваючої зони охоплення (2SFCA). Методика поєднує буферні зони за відстанню та зони охоплення за часом поїздки, що дозволяє гнучко оцінювати доступність залежно від уподобань користувача. На прикладі послуг гемодіалізу в штаті Теннессі було виявлено просторові відмінності в доступності: міські території мали вищі показники порівняно з сільськими та передміськими районами. Важливо, що аналіз включав розрахунок віково-зваженого населення, щоб врахувати нефізичні чинники, що впливають на доступ до послуг.

Стаття А. Кондесу-Мельорато та ін. обговорює використання нових джерел даних, таких як GPS, смартфони та смарт-карти, для покращення аналізу доступності⁷. Автори підкреслюють, що ці дані з високою просторовою та часовою роздільною здатністю дозволяють більш точно оцінювати переміщення населення, швидкість та час подорожей. Вони також розглядають використання цифрових мереж, таких як Google Maps та OpenStreetMap, для підвищення точності вимірювань. Стаття

⁵ Poudyal B., Ghoshal G., Kirkley A. Characterizing network circuitry among heterogeneous urban amenities. *J. R. Soc. Interface*. 2023. 20: 20230296.

⁶ Hashtarkhani S., Schwartz D. L., Shaban-Nejad A. Enhancing Health Care Accessibility and Equity Through a Geoprocessing Toolbox for Spatial Accessibility Analysis: Development and Case Study. *JMIR Form. Res.* 2024. 8: e51727.

⁷ Condeço-Melhorado A., Reggiani A., Gutiérrez J. New Data and Methods in Accessibility Analysis. *Netw. Spat. Econ.* 2018. 18. P. 237-240.

включає огляд восьми досліджень, які демонструють інноваційні підходи до аналізу доступності, зокрема використання великих даних та нових методологічних підходів.

У дослідженні Р. Сальзе та ін. розглядається взаємозв'язок між індивідуальною поведінкою, пов'язаною зі здоров'ям, та просторовою доступністю відповідних закладів, а також пропонується підхід до визначення транспортної на регіональному рівні з використанням агрегованих даних⁸. Авторами підкреслюється важлива роль відстані до міських центрів та необхідність багатовимірної оцінки доступності, що враховує поведінку під час подорожей. Ці висновки мають важливе значення для політики у сфері охорони здоров'я, оскільки підкреслюють необхідність врахування як житлових, так і нежитлових факторів при оцінці доступності медичних послуг.

В українському науковому географічному дискурсі поняття «транспортної доступності» має кілька розумінь, розгляду яких присвячена, наприклад, робота Пугач С. О. і Новосад С. В.⁹ За результатами аналізу автори доходять висновку, що з позицій суспільної географії суть цього поняття, як індикатора просторових можливостей суспільства, краще описується цього терміном «транспортна дискримінація». Він, на думку авторів, має більш широкую сутність і значно коректніше пояснює проблему транспортної територіальної доступності населення певної території. Під транспортною дискримінацією А. В. Мазурова та П. А. Вірченко розуміють явище просторової обмеженості транспортних послуг будь-якого територіального утворення (країни, області, району, міста, села) через низький або недостатній рівень розвитку транспортної мережі на даній території¹⁰. Транспортна дискримінація обмежує рівність людей, які проживають на певній території, стосовно якісних транспортних послуг, впливає на звуження мобільності населення, призводить до зниження їх конкурентоспроможності, змушує їх витратити більшу кількість часу та коштів на поїздки.

У даній роботі ми продовжуємо використовувати термін «транспортна доступність» а не «транспортна дискримінація», оскільки

⁸ Salze P., Banos A., Oppert J.M., et al. Estimating spatial accessibility to facilities on the regional scale: an extended commuting-based interaction potential model. *International Journal of Health Geographics*. 2011. 10: 2.

⁹ Пугач С. О., Новосад С. В. Трактвання понять «транспортна доступність» та «стиснення простору» у-сучасній науковій літературі // Актуальні проблеми країнознавчої науки : матеріали III Міжнар. наук. практ. інтернет-конференції (м. Луцьк, 15–16 грудня 2015 р.). Луцьк: Вежа, 2015. С. 28–31.

¹⁰ Мазурова А. В., Вірченко П. А. Суспільно-географічні чинники, які спричиняють транспортну дискримінацію населення України (на прикладі залізничного транспорту) // Регіон – 2012 : Стратегія оптимального розвитку : Матеріали наук.-практ. конф. з міжнародною участю. – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2012. – С. 144–147.

основна увага приділена кількісній оцінці структури транспортної мережі й просторовій організації зв'язків між населеними пунктами. Оскільки ми фокусувалися на з'ясуванні **структурних характеристик мережі** шляхом графового моделювання, аналізу центральності вузлів, а не соціальним нерівностям, термін «**транспортна доступність**» є більш коректним і нейтральним. Він дозволяє об'єктивно описати можливості переміщення територією, тоді як «**транспортна дискримінація**» передбачає соціально-економічну оцінку, що виходить за межі нашого моделювання.

Зазначеній проблематиці присвячено низку наукових праць вітчизняних вчених, які розглядають питання транспортної доступності на національному, регіональному та локальному рівнях. Зокрема у статті Анісімової С. В. та ін. представлено методичний підхід до оцінки заміських зон відпочинку вздовж річки Сіверський Донець з точки зору їх транспортної доступності. Автори підкреслюють, що транспортна доступність є ключовим фактором, що впливає на рекреаційну цінність територій локального рівня¹¹. У роботі запропоновано методику, яка враховує відстань до рекреаційних об'єктів, якість дорожньої інфраструктури та час, необхідний для досягнення цих зон відпочинку.

Близькою за тематикою є робота Анісімова С. В., де автор розробив класифікаційно-оціночні шкали, що дозволяють бально оцінити розташування рекреаційних територій відносно населених пунктів та різних варіантів доступу автомобільними дорогами. Дослідження охоплює шість потенційних рекреаційних територій вздовж річки Сіверський Донець у межах Харківської області¹².

Виявленню особливостей і просторових відмінностей рівня автомобільної транспортної доступності територій Запорізької області присвячена стаття Байтерякова О. З. і Воронової В. В. Авторами побудовано і проаналізовано графи автотранспортних мереж області та її адміністративних районів¹³. До кожного графу складено відповідні матриці із зазначенням найкоротших відстаней. На підставі розрахунків проведено оцінку і порівняльний аналіз рівня автомобільної транспортної доступності адміністративних одиниць Запорізької області.

¹¹ Анісімова С.В., Васенко О.Г., Анісімов С.В. Оцінка транспортної доступності заміських зон відпочинку як фактора, що впливає на рекреаційну цінність територій. Автомобільний транспорт. 2017. Вип. 41. С. 196-203.

¹² Анісімов С.В. Територіальна та транспортна доступність заміських рекреаційних територій для літнього відпочинку. Людина та довкілля. Проблеми неоекології. 2017. № 3-4. С. 95-104.

¹³ Байтеряков О. З., Воронова В. В. Топологічний аналіз автомобільної транспортної мережі Запорізької області. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія». 2024. Вип. 60. С. 137-158.

Барський Ю. М. та ін. досліджують транспортну доступність міста Луцька з використанням методу ізохронного аналізу, що дозволяє оцінити рівень доступу до ключових об'єктів транспортної інфраструктури. Автори звертають увагу на нерівномірність транспортної доступності між різними районами, що зумовлено як щільністю дорожньої мережі, так і організацією транспортних потоків¹⁴. Аналіз дозволяє визначити зони з обмеженою доступністю та запропонувати рекомендації для покращення транспортного планування, що є особливо актуальним у контексті підвищення мобільності населення та ефективності громадського транспорту.

У статті О. В. Дзюбинської та ін. досліджується вплив транспортної інфраструктури на розвиток туристично-рекреаційного сектору регіону. Автори акцентують увагу на тому, що якість транспортного сполучення є ключовим фактором, який визначає рівень доступності рекреаційних об'єктів¹⁵. Основними показниками оцінки транспортної мережі визначено тип покриття доріг, їх щільність, швидкість пересування, довжину мережі, категорію доріг, пропускну здатність та середньодобову інтенсивність руху. У роботі проведено порівняльний аналіз щільності та категорій доріг Волинської області та України в цілому. Автори пропонують методику визначення транспортного забезпечення рекреаційних зон, яка враховує довжину експлуатаційної мережі та чисельність населення регіону, що дозволяє оцінити динаміку транспортної забезпеченості під час сезонних відпусток.

Загурський О. М. аналізує різні підходи до оцінки транспортної доступності, зокрема, розглядає її як інституційну категорію, що відображає взаємозв'язок системи факторів для задоволення потреб у переміщенні людей та вантажів. Автор наголошує на необхідності розробки нової методологічної бази, яка б дозволила адекватно оцінювати територіальну диференціацію якості життя населення з урахуванням інституційних змін¹⁶. Особливу увагу приділено проблемам транспортного забезпечення сільських територій, де спостерігаються нестабільні автотранспортні зв'язки, нерегулярні автобусні маршрути та незадовільний стан місцевих доріг. Це призводить до транспортної дискримінації значної частини сільського

¹⁴ Барський Ю. М., Пугач С. О., Яковлев Т. В. Просторовий аналіз транспортної доступності територій у межах міста Луцька. Економічні науки. Серія : Регіональна економіка. 2016. Вип. 13. С. 35-45.

¹⁵ Дзюбинська О. В., Дзюбинський А. В., Смаль М. В. Оцінка транспортної доступності рекреаційних територій Волинської області. Економічні науки. Серія : Регіональна економіка. 2014. Вип. 11. С. 95-101.

¹⁶ Загурський О. М. Транспортна доступність сільських територій: методологічні підходи / О.М. Загурський. Автомобільний транспорт. 2018. Вип. 43. С. 65-70. 5

населення, обмежуючи його доступ до основних соціальних послуг, таких як охорона здоров'я, освіта та побутове обслуговування.

Лейберюк О. М. розглядає застосування геопросторового аналізу для оцінки доступності медичних послуг у контексті медичної реформи в Україні. Автор детально описує етапи проведення такого аналізу, зокрема визначення зон транспортної доступності до центрів госпітальних округів у межах 15, 30, 45, 60 хвилин та понад годину¹⁷. Особлива увага приділяється розподілу населення в цих зонах та аналізу їхньої вікової структури, що дозволяє виявити потенційні нерівності у доступі до медичних послуг. Крім того, досліджується доступність населення до центрів сусідніх госпітальних округів, що є важливим для планування ефективної медичної інфраструктури та забезпечення рівного доступу до якісної медичної допомоги для всіх верств населення.

Матійчик О. М. розглядає багатовимірність поняття транспортної доступності та її значення для ефективного функціонування транспортних систем. Підкреслюється, що традиційне розуміння транспортної доступності як часу або відстані перевезення є обмеженим. Натомість пропонується враховувати різні виміри цього показника, зокрема часовий, індивідуальний, соціальний, територіальний та економічний¹⁸.

Сільченко Ю. Ю. та ін. досліджують, як транспортна інфраструктура впливає на соціально-економічний розвиток Кіровоградського регіону. Автори підкреслюють, що багато населених пунктів області стикаються з проблемами низької транспортної зв'язаності з адміністративними центрами. Це обумовлено видовженою конфігурацією території, низькою якістю доріг та відсутністю регулярного транспортного сполучення¹⁹. Така ситуація призводить до транспортної дискримінації, що негативно впливає на мобільність населення та доступ до соціальних послуг.

Томашук М. М. розглядає застосування геоінформаційних систем (ГІС) для оцінки транспортної доступності в контексті формування об'єднаних територіальних громад в Україні. У дослідженні запропоновано методику визначення зон доступності потенційних адміністративних центрів шляхом побудови буферних зон з радіусом, що відповідає нормативним вимогам. Практична апробація методики

¹⁷ Лейберюк О.М. Транспортна доступність населення до центрів госпітальних округів (конкретний аналіз на прикладі Чернівецької обл.). Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія : Географічні науки. 2017. Вип. 7. С. 62-68.

¹⁸ Матійчик О. М. Теоретичні аспекти реалізації транспортної доступності пасажирських транспортних систем. Молодий вчений. 2017. № 9. С. 467-470.

¹⁹ Сільченко Ю. Ю., Семенюк Л.Л., Зарубіна А. В. Аналіз впливу транспортної доступності на соціально-економічний розвиток Кіровоградської області. Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Географічні науки. 2017. Вип. 7. С. 81-87.

проведена на прикладі Київської області, де було визначено 29 потенційних адміністративних центрів²⁰. Результати дослідження показали, що застосування ГІС-аналізу сприяє об'єктивному та науково обґрунтованому підходу до формування спроможних громад, забезпечуючи оптимальний розподіл ресурсів та послуг для населення.

В. М. Третяк та В. Б. Лепетюк досліджують алгоритм визначення транспортної доступності для проектування туристичних маршрутів, базуючись на ГІС-технологіях²¹. Вони використовують відкриті дані OpenStreetMap про туристичні об'єкти та дорожню мережу Тернопільщини, обробляючи їх за допомогою програмного забезпечення PostgreSQL, QGIS та GRASS GIS. Результатом є створення карт ізохрон, які відображають часову віддаленість при пересуванні певним видом транспорту вздовж дорожньої мережі від точок інтересу. Цей підхід дозволяє формувати базу даних про туристичні об'єкти та транспортні шляхи, уточнювати існуючі туристичні маршрути та створювати нові, що сприяє оптимізації туристичних екскурсій та підвищенню їх привабливості.

Уль А. В. та ін. пропонують методику моделювання транспортної доступності територій за допомогою побудови ізохрон із використанням відкритих даних OpenStreetMap, ГІС GRASS GIS та СКБД PostgreSQL. Автори підкреслюють, що розвинена транспортна інфраструктура підвищує цінність територій, впливаючи на вартість землі, нерухомості та соціально-побутову сферу. У дослідженні наведено карту ізохрон для Волинської області, яка показала, що близько 67% території регіону можна досягти з ключових населених пунктів протягом однієї години²². Запропонована методика може бути використана для швидкого аналізу доступності територій в інших регіонах, хоча автори зазначають, що її можливості обмежені без урахування таких факторів, як інтенсивність руху, якість покриття та швидкісні обмеження.

Яновський П. О. і Матійчик О. М. досліджують різні підходи до оцінки доступності пасажирського транспорту та пропонують систематизацію компонентів і показників для такої оцінки. Вони формалізують поняття інтегральної транспортної доступності, що дозволяє оцінити рівень розвитку транспортної інфраструктури регіону.

²⁰ Томашук М.М. Можливості геоінформаційного аналізу в дослідженнях транспортної доступності потенційних адміністративних центрів об'єднаних територіальних громад. Інженерна геодезія. 2018. Вип. 65. С. 126-135.

²¹ Третяк В. М., Лепетюк В. Б. Визначення транспортної доступності при формуванні туристичних маршрутів з допомогою QGIS та GRASS GIS. Містобудування та територіальне планування. 2021. Вип. 76. С. 297-307.

²² Уль А.В., Мельник О.В., Мельник Ю.А., Синій С.В. Геоінформаційне моделювання транспортної доступності територій. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2019. Вип. 12. С. 213-220.

Систематизація різних підходів до оцінки доступності транспорту на регіональному рівні та формалізація інтегральної транспортної доступності, запропоновані авторами, надають інструменти для комплексної оцінки транспортної інфраструктури регіонів та можуть бути використані для планування та вдосконалення транспортних систем²³.

Як бачимо, незважаючи на відносно суттєвий доробок вітчизняних авторів щодо вивчення транспортної доступності, Сумська область у цьому відношенні залишалася малодослідженою, що й спричинилося до вибору теми даного дослідження.

2. Оцінка транспортної доступності центрів територіальних громад Сумської області

Аналіз транспортної мережі проводився з використанням методів теорії графів, яка визначає топологічну транспортну доступність. Відповідно, транспортна мережа Сумської області була змодельована у вигляді неорієнтованого графа, де вузли представляли центри громад, а ребра відповідали прямим зв'язкам між ними. Координати вузлів були отримані з геопросторових даних, що забезпечило реалістичне позиціонування в мережі (рис. 1).

Оцінку топологічних характеристик графа було виконано за допомогою бібліотеки Networkx у середовищі Python. Зокрема були обчислені ключові топологічні характеристики графа, включаючи середню довжину найкоротшого шляху, що являє собою середню кількість кроків між вузлами; коефіцієнт кластеризації, що вказує на ступінь локальної взаємопов'язаності; щільність графа, що відображає відношення фактичних зв'язків до максимально можливих. Крім того було обчислено ефективність графа, як міру глобальної доступності та його діаметр (найдовший найкоротший шлях в мережі).

Для визначення критичних транспортних вузлів були розраховані міри центральності у т.ч ступеневу центральність, що показує кількість сполучень для кожного вузла; центральність близькості, що виділяє вузли з мінімальною середньою відстанню до інших, центральність посередництва, що визначає вузли, які виступають ключовими посередниками (транзитними вузлами в маршрутах). Візуалізація та інтерпретація результатів здійснювалася за допомогою бібліотек Matplotlib та Networkx. Всі розрахунки та моделювання були виконані в Google Colab, що дозволило інтерактивно обробляти та візуалізувати дані.

²³ Яновський П. О., Матійчик О. М. Оцінка доступності пасажирського транспорту на регіональному рівні. Наукоємні технології. 2013. № 3. С. 345-348.

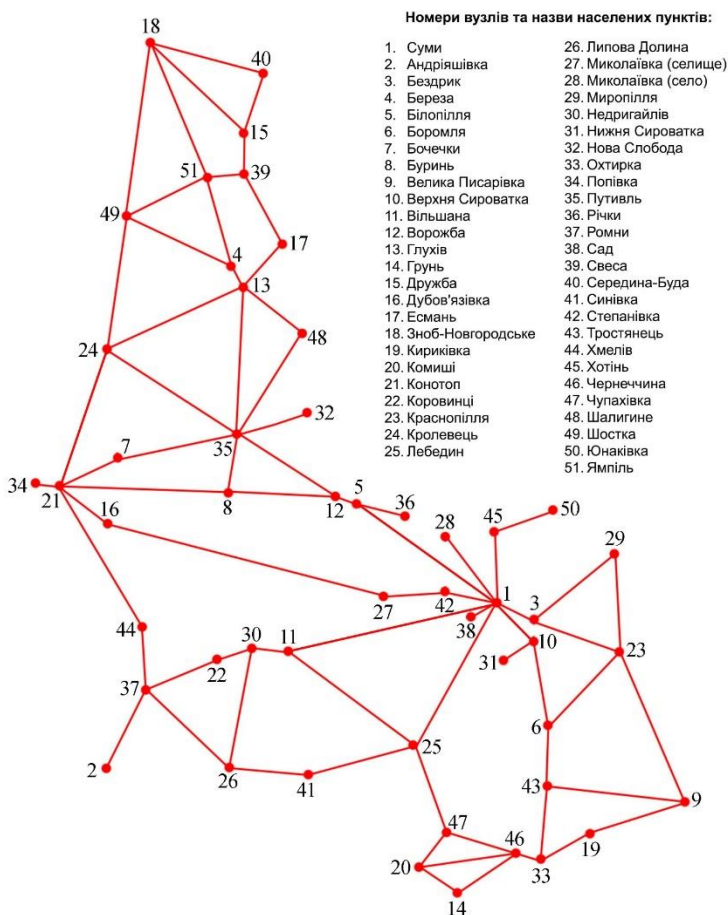


Рис. 1. Граф транспортної мережі Сумської області

Для оцінки часової доступності за абсолютними показниками, транспортна мережа була змодельована як неорієнтований зважений граф $G=(V,E)$, де V – множина населених пунктів (вузлів), а E – множина транспортних зв'язків (ребер) із вагами, що відповідають часу в дорозі. Розташування вузлів було проведено з прив'язкою до географічних координат для забезпечення просторової точності. Початкові оцінки часу подорожі базувалися на припущенні постійної швидкості руху 50 км/год. Для розрахунку найкоротшого часу подорожі від центрального вузла (районні чи обласний центр) до всіх інших вузлів у

мережі було використано алгоритм Дейкстри, який знаходить найкоротші шляхи від вихідного вузла до всіх інших у графі. Цей алгоритм працює за принципом жадібного пошуку: на кожному кроці вибирається вузол з мінімальною поточною відстанню, після чого перевіряються його сусіди, оновлюючи найкоротші відстані до них. При цьому, відстань між населеними пунктами (вершинами графу) вимірювалась в умовних кілометрах (ум. км), що враховують умови пересування. Ці умови залежать від категорії автомобільного шляху – якості дорожнього покриття, кількості смуг для руху, їх ширини та облаштування, що, як свідчать результати попередніх досліджень, дає більш точний результат. Для визначення відстані в ум. км застосовувались відповідні коефіцієнти, на які помножувалась реальна відстань. Так, для доріг національного значення застосовувався коефіцієнт 1,0, для регіональних доріг – 1,1, для територіальних доріг – 1,2, для обласних доріг – 1,4, для районних – 1,5. Названі коефіцієнти, з невеликими змінами, були запозичені нами з названої вище роботи О. З. Байтерякова і В. В. Воронової.

На першому етапі дослідження, для кількісної оцінки відносної територіальної доступності центрів громад, було складено та проаналізовано матрицю найкоротших топологічних відстаней між ними. Коефіцієнт транспортної доступності традиційно розраховано як співвідношення суми топологічних відстаней певного центру до суми ребер графа, яка дорівнює – 74.

Вершини з найменшим показником S є центральними на графі – це м. Ворожба, смт. Степанівка, м. Сумська, м. Лебедин і м. Білопілья. Сума топологічних відстаней коливається від 187 (Ворожба) до 420 (Середина буда). Коефіцієнт транспортної доступності (співвідношення суми топологічних відстаней до суми ребер графа) зворотно пропорційний величині суми топологічних відстаней та коливається від 2,6 (Ворожба) до 5,9 (Середина-Буда). Для міста Суми цей коефіцієнт складає 2,9. Проведені розрахунки засвідчують, що центральне розташування та вигідніше транспортно-географічне положення мають такі адміністративні центри – Ворожба (2,6), Степанівка (2,7), Суми (2,9), Лебедин і Білопілья (по 3,0); найгірше – Грунь, Свеса (по 4,7), Зноб-Новгородське (4,8), Кириківка (5,3), Хутір-Михайлівський (5,5) і Середина-Буда (5,9).

Крім того, було визначено ключові характеристики графа, що моделює реальну транспортну мережу в контексті її глобальної зв'язності.

Середня довжина найкоротших шляхів (глобальна зв'язність). Розрахунок середньої довжини (Average Path Length) як середнього

значення довжин найкоротших шляхів між усіма парами вузлів у графі виконано за формулою:

$$APL = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} d(i, j) \quad (1),$$

де: n – кількість вузлів у графі, $d(i, j)$

Встановлено, що середня довжина найкоротшого шляху (середня кількість кроків, необхідних для переходу від однієї вершини графа до іншої в найкоротший спосіб) дорівнює 4,67, що свідчить про те, що середньостатистичний маршрут у цій транспортній системі вимагає проходження приблизно 4–5 проміжних вузлів. Це вказує на відносно компакту структуру транспортної мережі Сумської області з хорошими можливостями зв'язку між вузлами (мережа не є надто фрагментованою, але й не має надзвичайно коротких маршрутів між усіма точками).

Середній коефіцієнт кластеризації – це метрика, яка оцінює, наскільки вузли в графі схильні утворювати локальні «кластери» або «тріади». Іншими словами, він показує, наскільки ймовірно, що два сусіди певного вузла також безпосередньо з'єднані між собою тобто характеризує рівень локальної зв'язності графа. Середній коефіцієнт кластеризації знаходиться як середнє значення всіх локальних коефіцієнтів кластеризації:

$$C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n C_i \quad (2),$$

де C_i – коефіцієнт кластеризації окремого вузла:

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \quad (3),$$

де: E_i – кількість зв'язків між сусідами вузла i , k_i – ступінь вузла i (кількість сусідів).

Отримане для транспортної мережі Сумської області значення коефіцієнту кластеризації – 0,17 є доволі низьким, що свідчить про відсутність значного рівня локальної інтеграції вузлів (що вузли графа утворюють невелику кількість локальних спільнот). Це означає, що в цій транспортній мережі переважає радше ієрархічна структура із значною кількістю транзитних вузлів, аніж кластеризована топологія, типова для міських вуличних мереж. Така структура вказує на значну частку регіональних і територіальних доріг з обмеженим числом альтернативних зв'язків між центрами громад.

Діаметр графа визначається як найдовший з найкоротших шляхів між будь-якими двома вершинами. Розраховане нами значення 11 вказує, що найвіддаленіші вузли потребують 11 переходів (кроків) для з'єднання, тобто про те, що в транспортній мережі Сумської області є деякі вузли, що значно віддалені від інших, можливо, через обмежену кількість мостів через Сейм (3 мости) або магістральних шляхів.

Ефективність графа – це міра, яка враховує зворотну величину найкоротших відстаней між усіма парами вузлів і є індикатором того, наскільки «зручно» або «швидко» можна забезпечити транспортну доступність між вузлами. Чим коротша відстань між двома вузлами, тим більший внесок цієї пари вузлів в загальну ефективність. Підсумок цих внесків нормалізується на кількість пар вузлів $n(n-1)$, щоб отримати середнє значення ефективності. Ефективність графа $E(G)$ розраховується за формулою:

$$E(G) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (4),$$

де: N – кількість вузлів у графі, d_{ij} – найкоротша відстань між вузлами i та j (вимірюється у кількості ребер), $\frac{1}{d_{ij}}$ – «ефективність» зв'язку між вузлами i та j .

Отримане для транспортної мережі Сумської області значення графа 0,29 означає, що середньостатистично транспортна доступність усіх вузлів забезпечена, проте вона досить обмежена через відносно великі найкоротші відстані між багатьма парами вузлів. Центри громад розташовані на значній відстані один від одного (і зв'язок між ними зазвичай не є прямим).

Центральність. Як відомо, центральність вузлів показує, які з них найважливіші для транспортної мережі. Для оцінки центральності було використано 4 метрики: ступенева центральність (Degree Centrality) – кількість ребер, що виходять із вузла; центральність близькості (Closeness Centrality) – наскільки швидко можна досягти інших вузлів із заданого, центральність посередництва (Betweenness Centrality) – скільки найкоротших шляхів проходить через вузол і центральність власного вектора (Eigenvector Centrality), що враховує не лише кількість зв'язків вузла, а й важливість його сусідів.

Ступенева центральність $D_c(v)$. Це одна з найпростіших, але водночас важливих метрик, яка визначає значущість вузла на основі кількості його прямих зв'язків із сусідніми вузлами. Для неорієнтованого графа ступенева центральність визначається як:

$$D_c(v) = \frac{\deg(v)}{n-1} \quad (5),$$

де: $D_c(v)$ – ступенева центральність вузла, $\deg(v)$ – ступінь вузла (кількість його зв'язків), n – загальна кількість вузлів у графі, $n-1$ – максимальна можлива кількість зв'язків для вузла.

Найвищі показники ступеневої центральності мають вузли: Суми – 0,18 (найбільше зв'язків у графі), Путиль – 0,14 і Конотоп – 0,12 відповідно. Їхня висока ступенева центральність вказує на ключову роль у зв'язності всієї системи транспортного сполучення Сумської області. Ці вузли, разом з Ворожбою (вузол 13), також відіграють критичну роль

у підтримці транспортного потоку. Інші вузли, зокрема Кролевець, Шостка, Ямпіль та деякі інші є ключовими точками зв'язку в регіональних частинах мережі. Аналіз показників ступеневої центральності для 5 найважливіших вузлів транспортної мережі Сумської області за цим показником наведено у табл. 3.

Таблиця 3

ТОП-5 найважливіших вузлів транспортної мережі Сумської області за ступеневою центральністю

Вузол		Ступенева центральність
номер на графі	назва	
1	Суми	0,18
35	Путівль	0,14
21	Конотоп	0,12
13	Ворожба	0,10
24	Кролевець	0,08

Вузли 50, 36, 34 та ін. мають значення ступеневої центральності 0,2 (табл. 4) – це вузли з найменшою кількістю зв'язків, а окремі з них (32, 36, 50 – тупиковими маршрутами. Відповідно вони є центрами периферійних громад з найгіршою транспортною доступністю.

Таблиця 4

ТОП-10 найпериферійніших вузлів транспортної мережі Сумської області за ступеневою центральністю

Вузол		Ступенева центральність
Номер на графі	назва	
45	Хотінь	0,04
22	Коровинці	0,04
28	с. Миколаївка	0,02
38	Сад	0,02
31	Нижня Сироватка	0,02
32	Нова Слобода	0,02
2	Андріяшівка	0,02
50	Юнаківка	0,02
36	Річки	0,02
34	Попівка	0,02

Наявність територіальних громад з дуже низькими значеннями центральності ($\leq 0,02$) свідчить про їх слабку інтеграцію в систему (периферійність), що свідчить про проблеми з транспортною доступністю чи, до певної міри, ізолюваність деяких громад.

Центральність близькості $C_C(v)$ є ключовою метрикою, яка дозволяє оцінити, наскільки ефективно вузол взаємодіє з усією мережею, тобто

наскільки швидко можна досягти інших вузлів із цієї точки. Формально вона визначається за формулою:

$$C_c(v) = \frac{n-1}{\sum_{u \neq v} d(u,v)} \quad (6),$$

де: $n - 1$ загальна кількість вузлів у графі, $d(u, v)$ – найкоротша відстань (довжина шляху) між вузлами u, v .

Вузол із високим значенням знаходиться в центрі мережі – звідти можна швидко дістатися до інших вузлів. Висока центральність близькості зазвичай характерна для великих крупних центрів громад, які є логістичними центрами чи пересадковими станціями зі значним пасажиропотоком. Відповідно, низька центральність близькості характерна для периферійних громад, звідки шлях до більшості центрів – довгий. Зазвичай це центри прикордонних громад чи малозв'язані населені пункти. Відтак оцінка транспортної мережі за центральністю близькості є особливо важливою для розуміння **транспортної ефективності, ідентифікації важливих особливостей транспортної доступності та виявлення периферійних зон.**

Результати розрахунків показали, що найбільш доступними з погляду транспортної ефективності є такі вузли: **Суми (0,3125)** – є **найважливішою точкою транспортної доступності**, забезпечуючи ефективний зв'язок з іншими частинами мережі. Високі значення СС також мають Білопілля (0,2959), Ворожба (0,2841), Путивль (0,2646) і Лебедин (0,2660). Ці центри громад мають **найкраще географічне розташування** в контексті мінімізації часу руху по всій мережі. Вони є **знаходяться на перетині доріг**, які пов'язують різні частини області.

Як бачимо, Суми мають найвище значення C_c і D_c , що підтверджує їх роль як ключового вузла для зв'язності всієї мережі. Те саме можна сказати і про Путивль, який також є ключовою точкою у забезпечення транспортної доступності в регіоні. Білопілля (0,2959) та Ворожба (0,2841) також мають високі значення, що свідчить про їхнє вигідне положення, адже (C_c) показує, наскільки певний вузол структурно близький до всіх інших у мережі (чим вище значення C_c , тим швидший доступ до інших вузлів). Білопілля, Ворожба і Лебедин мають низьку ступеневу центральність, але високу доступність (табл. 5) – це свідчить про їхнє стратегічне розташування.

Серед центрів громад найнижчою транспортною доступністю за центральністю близькості можна виокремити: Середина-Буду (0,1524), Грунь (0,1629) та Дружбу (0,1543), що розташовані на периферії транспортної мережі регіону. Свеса (0,1706) і Боромля (0,1656) також демонструють низьку транспортну доступність, що є наслідком їх віддаленого розташування (табл. 6).

Таблиця 5

**ТОП-5 вузлів за центральністю близькості та порівняння
зі ступеневою центральністю**

Вузол	Центральність близькості	Ступенева центральність
Суми	0,3125	0,18
Білопілья	0,2959	0,06
Ворожба	0,2841	0,06
Лебедин	0,2660	0,06
Путівль	0,2646	0,14

Таблиця 6

**Найпериферійніші вузли за центральністю близькості
та порівняння зі ступеневою центральністю**

Вузол	Центральність близькості	Ступенева центральність
Середина-Буда	0,1524	0,04
Хутір-Михайлівський	0,1543	0,06
Грунь	0,1629	0,04
Свеса	0,1706	0,06
Боромля	0,1661	0,06

Аналіз центральності близькості дозволив виявити основні транспортні вузли, та визначити периферійні громади за транспортною доступністю. Отримані результати можуть бути використані для стратегічного планування інфраструктури, оптимізації транспортних маршрутів та підвищення загальної ефективності транспортної мережі Сумської області. Однак, застосування цього показника дає можливість розширити тематику дослідження, зокрема розглянувши вплив окремих вузлів на транспортні маршрути, визначення критичних точок мережі та потенційні напрями для інфраструктурних змін.

Окрім окремого розгляду вузлів із високими та низькими значеннями центральності, важливо оцінити вузли, які є критичними для збереження зв'язності мережі. Передусім варто виділити вузли, що формують транспортні коридори. Вони можуть не мати найвищої центральності близькості, але водночас вони забезпечують ключові переходи до інших центрів громад. Так, Шостка ($C_s = 0,2083$) – відіграє важливу роль у з'єднанні периферійних районів із центральною частиною мережі. Втрата цього вузла може значно вплинути на зв'язність транспортної системи Сумської області. Він також напряму зв'язаний важливими центрами інших громад (наприклад, Ямпіль і Зноб-Новгородське), що робить його ключовим для підтримки загальної зв'язності мережі.

Ромни також мають досить високе значення центральності близькості ($C_s = 0,2262$), що вказує на його важливість у швидкому

доступі до багатьох інших регіонів області. Відтак Шостка і Ромни – це важливі транзитні вузли, через які проходять ключові маршрути, і їх ефективність значно впливає на загальну швидкість пересування мережею.

Окремі вузли через своє значення, особливості розташування та невідгінну альтернативність, можуть стати потенційними «пляшковими горлечками», спричинивши суттєве ускладнення транспортної доступності. Серед них Суми ($C_c = 0,2392$), які хоч і є найкраще інтегрованим вузлом, але, разом з тим, його важливість означає, що будь-які порушення в функціонуванні можуть викликати затримки у всій системі. Якщо цей вузол-стане недоступним, середня довжина маршрутів у мережі значно зростає. Альтернативні шляхи значно довші, що збільшить загальний транспортний час у регіоні (видалення вузла 1 з мережі збільшує середню довжину маршруту на 15-20%, що підтверджує його роль як потенційного вузького місця).

Таким центром є і вузол 35 (Путивль), який забезпечує зв'язок між північною і південною частинами області та перехід через р. Сейм. Путивль входить у ТОП-5 вузлів за D_c і C_c , тобто є ключовим у транспортній доступності. Річка Сейм створює природний бар'єр, і якщо вузол 35 стане недоступним, більшість маршрутів значно подовжаться. Наявність лише кількох мостів через річку збільшує ризик транспортних затримок. Якщо його видалити, частина мережі буде ізольована або вимагатиме об'їзду через Конотоп, що збільшить транспортні витрати. Перерахунок найкоротших шляхів показує, що у випадку переривання транспортного сполучення з Путивлем, підвищення середньої довжини маршруту складе 12-18%. Те саме можна сказати і про Конотоп (0,2475), а також **Хутір-Михайлівський ($C_c = 0,1543$)**, через який забезпечується зв'язок з Свеською та Зноб-Новгородською громадами. В цьому контексті передусім варто виділити Конотоп, що, як і Путивль, з'єднує декілька важливих транспортних маршрутів, що робить його ключовою точкою транзиту для пересування між різними частинами області. Але Путивль має більше значення C_c , ніж Конотоп (який є важливим, але менш доступним вузлом), що вказує на більшу кількість альтернативних маршрутів через нього.

Центральність посередництва (B_c) є однією з найважливіших характеристик транспортної мережі є, яка дозволяє оцінити, наскільки часто певний вузол розташований на найкоротших маршрутах між іншими вузлами мережі. Дана метрика є критичною для аналізу транзитних транспортних вузлів, ідентифікації вузьких місць у транспортній доступності та оптимізації потоків у транспортній системі. Центральність посередництва $B_c(v)$ для кожного вузла v

визначається як сума часток усіх найкоротших шляхів між парами вузлів s і t , які проходять через вузол v за формулою:

$$B_c(v) = \sum_{s \neq v \neq t} \frac{\delta_{s,t}(v)}{\delta_{s,t}} \quad (7),$$

де s та t – усі можливі пари вузлів у графі; де $s \neq v$ і $t \neq v$, δ_{st} – кількість найкоротших шляхів між вузлами s і t ; $\delta_{st}(v)$ – кількість таких шляхів, які проходять через вузол v .

Ця метрика дозволяє додатково оцінити, наскільки важливий вузол у забезпеченні зв'язності мережі та як сильно він впливає на ефективність транспортних потоків. Найвище значення центральності посередництва (0,5712) мають Суми, що означає, що через нього проходить найбільше найкоротших маршрутів у мережі. Це підтверджує стратегічне значення обласного центру, як головного вузла у забезпеченні транспортної доступності до решти центрів громад області. Білопілля, Путивль і Ворожба також відіграють вирішальну роль у зв'язності транспортної системи, і їхнє значення B_c (табл. 7) вказує, що будь-яке обмеження доступу до цього вузла може мати значний вплив на транспортну доступність у регіоні. Важливе значення мають й інші центри, наведені у табл. 7, які також **відіграють значну роль у підтримці транспортної доступності**, а їхнє функціонування є критичним для стабільності транспортної системи. Зокрема Кролевець і Лебедин ($B_c \approx 0,188$) забезпечують зв'язок між периферією та центром мережі; Конотоп ($B_c = 0,1764$) традиційно забезпечує важливий транспортний коридор, що полегшує пересування між різними частинами регіону.

Таблиця 7

ТОП-10 вузлів за центральністю посередництва

Вузол	Центральність посередництва
Суми	0,5712
Білопілля	0,3474
Ворожба	0,3175
Путивль	0,3017
Лебедин	0,1886
Кролевець	0,1876
Конотоп	0,1764
Шостка	0,1246
Чупахівка	0,1227
Глухів	0,1223

Центральність власного вектора (E_c) – це метрика, що визначає вплив вузла у мережі, враховуючи не лише його ступінь (кількість зв'язків), а й впливовість сусідніх вузлів. На відміну від D_c , яка просто рахує кількість зв'язків вузла, E_c враховує якість цих зв'язків: вузол отримує вищий бал, якщо він з'єднаний із важливими вузлами.

Відповідно, вузол із високим E_c – це не просто вузол із багатьма зв'язками, а той, який пов'язаний із важливими вузлами. Вузол із низьким E_c може мати багато зв'язків, але якщо вони ведуть до слабовпливових вузлів, його вплив у системі буде низьким. Це видно на прикладі Сум, що лідирували за іншими метриками, але за E_c поступаються багатьом іншим центрам громад. Центральність власного вектора вузла x_i визначається наступною рекурентною формулою:

$$x_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j \in n_i} A_{i,j} x_j \quad (8),$$

де: x_i – значення E_c для вузла i , A_{ij} – елемент матриці суміжності (A), що дорівнює 1, якщо між вузлами i та j є зв'язок, x_j – E_c сусіднього вузла, λ – найбільше власне число (eigenvalue) матриці A , яке нормалізує значення центральності.

Як випливає з розрахунків, Путивль-є найважливішим у транспортній системі Сумської області за E_c , оскільки пов'язаний із багатьма іншими впливовими вузлами. Глухів, Кролевець і Конотоп мають високу значущість у мережі за цією метрикою, що вказує на їхню важливу комунікаційну роль. Буринь, Шостка, Шалигине також мають високе значення E_c завдяки хорошим зв'язкам із впливовими вузлами.

Разом з тим, на графі можна виділити кілька областей, де вузли мають підвищену щільність з'єднань, що дає можливість виділити тут локальні кластери. Кластер 1 включає м. Суми і центри прилеглих громад (вузли: 1, 10, 11, 25, 38, 42, 45, 50), які формують густу мережу зав'язків у східній частині області. Вузол 1 (м. Суми) має найвищу ступеневу центральність (0,18) та високий коефіцієнт посередництва (0,57), що свідчить про його роль у забезпеченні зв'язності між цим кластером та іншими частинами транспортної мережі. Кластер 2 виділяється у західній частині області (вузли 7, 16, 21, 24, 34). Ця група вузлів має щільні внутрішні зв'язки. Вузол 21 (Конотоп) є центральним для цього району. Кластер 3 містить вузли з високим рівнем взаємодії у центральній частині області (4, 13, 17, 24, 35, 48, 51). Вузол 35 (Путивль) є особливо важливим (ступенева центральність 0,14), оскільки з'єднує внутрішні вузли цього кластера з іншими регіонами транспортної мережі й може розглядатися як локальний транспортний хаб. Кластер 4 виділяється у південній частині регіону (вузли 19, 20, 33, 43, 46, 47). Вузли цього кластера тісно з'єднані між собою та формують периферійну частину графа.

Найбільш зв'язний регіон – кластер 1 (Сумський), який містить вузол 1 як основний транспортний хаб. Путивльський кластер (кластер 3) містить вузли з високою щільністю з'єднань, але ізольований від інших частин мережі. Кластери 2 і 4 відповідають периферійним зонам, де локальні зв'язки є більш розвиненими, ніж глобальні.

Таким чином, за метриками центральності, найкращу транспортну доступність і ключовий вплив на всю зв'язність мережі транспортного обслуговування мають Суми: найвищі $D_c = 0,18$ (найбільше зв'язків),

$C_c = 0,3125$ (найкоротша середня відстань до інших вузлів) і $V_c = 0,5712$ (найбільш «транзитний» вузол); лише $E_c = 0,0649$ (низький вплив порівняно з іншими важливими вузлами, адже всі його сусіди менш важливі, ніж у Путивля).

Путивль має дещо нижче $D_c = 0,14$ (багато зв'язків), натомість у нього висока $C_c = 0,2646$ (один із найшвидших доступів до інших точок), $V_c = 0,3017$ (часто є критичною транзитною точкою) та $E_c = 0,4579$ (найвищий вплив у мережі). Відповідно, Путивль є другим центральним транспортним вузлом, через який проходить значна частина потоків. Його «втрата» суттєво вплине на транспортну доступність багатьох територіальних громад області.

Конотоп має $D_c = 0,12$ (вище середнього), $C_c = 0,2475$ (висока транспортна доступність), $V_c = 0,1764$ (важливий, але не критичний) $E_c = 0,2771$ (один із найбільш впливових) свідчить про те, що він є добре інтегрованим у транспортну систему, зокрема має високу C_c та E_c , що вказує на його значну роль у забезпеченні регіональної транспортної доступності.

Так само є можливість виділити і 3 центри з найгіршою транспортною доступністю, серед яких Грунь, Кириківка і Юнаківка. Грунь має мало зв'язків з іншими вузлами $D_c = 0,04$, $C_c = 0,1629$ (дуже низька доступність), $V_c = 0,0$ (не виконує роль транзитного пункту), $E_c = 0,0023$ (майже не впливає на мережу). Кириківка також має низьку інтегрованість в транспортну систему Сумської області: $D_c = 0,04$ (мало зв'язків), $C_c = 0,1661$ (низька доступність), $V_c = 0,0039$ (майже не використовується в транзиті), $E_c = 0,0023$ (мінімальний вплив). Однією із найменш інтегрованих у транспортну мережу Сумської області є Юнаківка: $D_c = 0,02$ (мінімальні зв'язки), $C_c = 0,1953$ (низька доступність), $V_c = 0,0$ (не є транзитним пунктом), $E_c = 0,0049$ (мінімальний вплив).

ВИСНОВКИ

Проведене дослідження транспортної доступності центрів громад Сумської області засвідчило високу інформативність методів теорії графів у контексті просторового аналізу регіональних мереж. Побудова неорієнтованого графа на основі прямого транспортного сполучення між адміністративними центрами громад дозволила виявити як сильні сторони існуючої транспортної конфігурації, так і її вразливі зони.

Отримані показники глобальних характеристик графа – зокрема середня довжина найкоротших шляхів, щільність, коефіцієнт кластеризації та діаметр – свідчать про помірну зв'язність транспортної системи. З одного боку, центральна частина області має відносно компактную та інтегровану структуру, де більшість населених пунктів мають зв'язки через 2–3 кроки. З іншого – периферійні громади, особливо північного та північно-східного сектора, демонструють ознаки

просторової ізолюваності, що підтверджується зростанням кількості проміжних вузлів для досягнення обласного центру.

Аналіз ступеневої центральності виявив найбільш з'єднані вузли, зокрема Суми, Путивль, Ворожба, Конотоп, що мають найбільшу кількість безпосередніх транспортних контактів із іншими громадами. Ці центри відіграють роль регіональних хабів і можуть розглядатися як потенційні осередки інтеграції між територіальними одиницями. Водночас, центри з низьким значенням цього показника (наприклад, Ямпіль, Грунь, Дружба) свідчать про обмежену включеність до транспортного простору області.

Оцінка центральності близькості дозволила виявити, які громади знаходяться в найкращому положенні щодо потенційного доступу до решти мережі. Найвищі значення отримали Суми, Білопіль, Ворожба, Путивль, Недригайлів, тобто ті центри, які географічно або мережево перебувають у «серединному» положенні. Навпаки, значення центральності близькості для Середина-Буда, Зноб-Новгородське, Дружба або Свеса є найнижчими – що свідчить про маргінальність їх просторового положення і, ймовірно, знижує рівень їх доступності для інших громад.

Центральність посередництва дозволила ідентифікувати вузли, що виконують функцію транзитних каналів для найкоротших маршрутів між іншими парами громад. Найвищі значення показника були притаманні Сумам, що підтверджує їх ключову роль як структурного центру всієї мережі. Іншими важливими посередницькими вузлами стали Путивль, Ворожба, Білопіль, Дубов'язівка та Конотоп. Це саме ті громади, які варто розглядати як опорні елементи міжмуніципального транспортного каркасу. Втім, наявність таких «вузьких місць» у мережі також вказує на потенційні загрози у разі порушення транспортної доступності до них – особливо в умовах кризових чи надзвичайних ситуацій.

Загальна картина засвідчує, що, попри певний рівень компактності, транспортна мережа Сумської області має нерівномірну просторову структуру. Центральні громади демонструють високі показники мережевої доступності та зв'язності, тоді як периферійні – особливо на півночі та південному сході області – мають ознаки інфраструктурної віддаленості. Це створює передумови для формування просторової поляризації на рівні громад.

Результати аналізу дозволяють сформулювати низку прикладних висновків. По-перше, громади з низькими показниками центральності повинні бути пріоритетними об'єктами для розвитку дорожньої інфраструктури. По-друге, транзитні вузли потребують підтримки з метою забезпечення стійкості мережі. По-третє, подальше застосування методів теорії графів може стати ефективним інструментом для просторового планування та оцінки змін у доступності при реалізації нових інфраструктурних проєктів.

АНОТАЦІЯ

Розглянуто проблематику транспортної доступності центрів територіальних громад Сумської області, як ключового чинника просторової організації регіону в умовах адміністративно-територіальної реформи. Об'єктом дослідження виступає транспортна мережа Сумської області, а основною метою є виявлення рівня зв'язності між центрами територіальних громад. Методологічною основою дослідження є апарат теорії графів, який дозволяє змодельовати транспортну мережу як неорієнтований граф, вузлами якого є центри громад, а ребрами – прямі транспортні зв'язки між ними. За допомогою геопросторових координат побудовано топологічну модель, на основі якої розраховано ключові показники: середню довжину найкоротшого шляху, щільність графа, коефіцієнт кластеризації, діаметр та ефективність мережі. Також оцінено ступеневу, близькісну, посередницьку та ейгенвекторну центральності вузлів. Отримані результати дали змогу виявити як центральні, так і периферійні територіальні громади, зокрема визначити найбільш інтегровані транспортні вузли (Суми, Путивль, Конотоп) та громади з обмеженою транспортною досяжністю (Грунь, Кириківка, Юнаківка). Дослідження може слугувати основою для просторового планування, удосконалення логістичних зв'язків і підвищення регіональної транспортної інтеграції.

Література

1. Підгрушний Г. П. та ін. Інтегральний потенціал території – теоретичні та практичні аспекти дослідження: монографія / Підгрушний Г. П., Нагірна В. П., Фашевський М. І., Горленко І. О., Качаєв Ю. Д., Савчук І. Г., Яснюк Т. Є., Дубін В. Г., Шабашова Л. Ю., Денисенко О. О., Пашинська Н. М., Немченко М. П., Середа Н. І., Бондар В. В., Дем'яненко Т. В., Воловик Л. М., Ісиченко І. В.; К.: Ін-т географії НАН України. 2012. 464 с.
2. Blanchard S. D. Waddell P. UrbanAccess: generalized methodology for measuring regional accessibility with an integrated pedestrian and transit network. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board. 2017. 2653(1). P. 35-44. DOI: <https://doi.org/10.3141/2653-05>
3. Park J., Goldberg D. W. A Review of Recent Spatial Accessibility Studies That Benefitted from Advanced Geospatial Information: Multimodal Transportation and Spatiotemporal Disaggregation. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021. 10(8). 532. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi10080532>
- 4.– Büttner B., Kinigadner J., Ji C. et al. The TUM Accessibility Atlas: Visualizing Spatial and Socioeconomic Disparities in Accessibility to Support Regional Land-Use and Transport Planning. *Netw. Spat. Econ*. 2018. 18.-P. 385–414. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11067-017-9378-6>

5. Poudyal B., Ghoshal G., Kirkley A. Characterizing network circuitry among heterogeneous urban amenities. *J. R. Soc. Interface*. 2023. 20: 20230296. DOI: <https://doi.org/10.1098/rsif.2023.0296>

6. Hashtarkhani S., Schwartz D. L., Shaban-Nejad A. Enhancing Health Care Accessibility and Equity Through a Geoprocessing Toolbox for Spatial Accessibility Analysis: Development and Case Study. *JMIR Form. Res*. 2024. 8: e51727. DOI: <https://doi.org/10.2196/51727>

7. Condeço-Melhorado A., Reggiani A., Gutiérrez J. New Data and Methods in Accessibility Analysis. *Netw. Spat. Econ*. 2018. 18. P. 237–240. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11067-018-9404-3>

8. Salze P., Banos A., Oppert J.M., et al. Estimating spatial accessibility to facilities on the regional scale: an extended commuting-based interaction potential model. *International Journal of Health Geographics*. 2011. 10: 2. DOI: <https://doi.org/10.1186/1476-072x-10-2>

9. Пугач С. О., Новосад С. В. Трагування понять «транспортна доступність» та «стиснення простору» у-сучасній науковій літературі // Актуальні проблеми країнзнавчої науки : матеріали III Міжнар. наук. практ. інтернет-конференції (м. Луцьк, 15–16 грудня 2015 р.). Луцьк: Вежа, 2015. С. 28–31.

10. Мазурова А. В., Вірченко П. А. Суспільно-географічні чинники, які спричиняють транспортну дискримінацію населення України (на прикладі залізничного транспорту) // Регіон – 2012 : Стратегія оптимального розвитку : Матеріали наук.-практ.-конф. з міжнародною участю. – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2012. – С. 144–147.

11. Анісімова С. В., Васенко О. Г., Анісімов С. В. Оцінка транспортної доступності замських зон відпочинку як фактора, що впливає на рекреаційну цінність території. *Автомобільний транспорт*. 2017. Вип. 41. С. 196-203. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2017.41.0.196>

12. Анісімов С. В. Територіальна та транспортна доступність замських рекреаційних територій для літнього відпочинку. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2017. № 3-4. С. 95-104.

13. Байтеряков О. З., Воронова В. В. Топологічний аналіз автомобільної транспортної мережі Запорізької області. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2024. Вип. 60. С. 137-158. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-60-10>

14. Барський Ю. М., Пугач С. О., Яковлев Т. В. Просторовий аналіз транспортної доступності територій у межах міста Луцька. *Економічні науки. Серія : Регіональна економіка*. 2016. Вип. 13. С. 35-45.

15. Дзюбинська О. В., Дзюбинський А. В., Сміль М. В. Оцінка транспортної доступності рекреаційних територій Волинської області. *Економічні науки. Серія : Регіональна економіка*. 2014. Вип. 11. С. 95-101.

16. Загурський О. М. Транспортна доступність сільських територій: методологічні підходи. *Автомобільний транспорт*. 2018. Вип. 43. С. 65-70. DOI: <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2018.43.0.65>
17. Лейберюк О. М. Транспортна доступність населення до центрів госпітальних округів (конкретний аналіз на прикладі Чернівецької обл.) / О. М. Лейберюк. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія : Географічні науки*. 2017. Вип. 7. С. 62-68.
18. Матійчик О. М. Теоретичні аспекти реалізації транспортної доступності пасажирських транспортних систем. *Молодий вчений*. 2017. № 9. С. 467-470.
19. Сільченко Ю. Ю., Семенюк Л.Л., Зарубіна А. В. Аналіз впливу транспортної доступності на соціально-економічний розвиток Кіровоградської області. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Географічні науки*. 2017. Вип. 7. С. 81-87.
20. Томашук М. М. Можливості геоінформаційного аналізу в дослідженнях транспортної доступності потенційних адміністративних центрів об'єднаних територіальних громад. *Інженерна геодезія*. 2018. Вип. 65. С. 126-135.
21. Третьак В. М., Лепетюк В. Б. Визначення транспортної доступності при формуванні туристичних маршрутів з допомогою QGIS та GRASS GIS. *Містобудування та територіальне планування*. 2021. Вип. 76. С. 297-307. DOI: <https://doi.org/10.32347/2076-815x.2021.76.297-307>
22. Уль А. В., Мельник О. В., Мельник Ю. А., Синій С. В. Геоінформаційне моделювання транспортної доступності територій. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2019. Вип. 12. С. 213-220. doi: [https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-2\(12\)-26](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2019-2(12)-26)
23. Яновський П. О., Матійчик О. М. Оцінка доступності пасажирського транспорту на регіональному рівні. *Наукові технології*. 2013. № 3. С. 345-348.

Information about the author:

Kornus Anatolii Oleksandrovych,

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,

Associate Professor at the Department of General

and Regional Geography

Sumy State Pedagogical University named after A. S. Makarenko

87, Romenska str., Sumy, 40002, Ukraine