

УДК 528:489
UDC 528:489

DOI:10.33744/0365-8171-2023-114.2-133-142

ТЕОРІЯ ТА МЕТОДИ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ
МЕРЕЖ В УМОВАХ РОСІЙСЬКО-УКРАЇНСЬКОЇ ВІЙНИ

THEORY AND METHODS OF GEOINFORMATION MODELING OF TRANSPORT
NETWORKS IN THE CONDITIONS OF THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR



Ляшенко Дмитро Олексійович, доктор географічних наук, доцент, професор кафедри системного проектування об'єктів транспортної інфраструктури та геодезії, Національний транспортний університет. м. Київ, Україна. e-mail: uageog@gmail.com, тел. +380673235684,

<https://orcid.org/0000-0001-5588-0322>

Анотація: В роботі розглянуті завдання, напрями і методи геоінформаційного моделювання транспортних мереж. Дослідження досвіду попередників дозволило визначити сучасні особливості розвитку наземного транспорту, та тренди, що його визначають: зростання попиту на перевезення, зменшення питомих витрат, зміна транспортної інфраструктури та вимоги до безпеки перевезень, пов'язанні з воєнними діями. Визначено, що геоінформаційні системи дозволяють застосувати численні моделі для оцінювання фактичного стану і ефективності мереж транспорту шляхом порівняння витрат часу та коштів для перевезення одиниці маси вантажу. Відмічені величезні фінансові витрати на перевезення вантажів в умовах Російсько-Української війни. Запропоновано основні напрями дій щодо оптимізації мережі автомобільних доріг України з метою підвищення ефективності перевезень.

Ключові слова: транспортні мережі, автомобільні дороги, геопросторові дані, національна інфраструктура геопросторових даних, рельєф, геодезичні методи, мережевий аналіз, оптимізаційні моделі

Вступ. Транспорт в усі часи забезпечував мобільність населення та перевезенням вантажів. Нині, з розвитком людської цивілізації, особливий інтерес викликають дослідження, пов'язанні з тим, як ця мобільність відбувається у конкретних умовах. Наша робота присвячена огляду напрямів досліджень просторових характеристик транспортних мереж в Україні контексті російсько-української війни. За словами французького географа Жана Поля Родріга [7], мобільність обмінює простір на вартість. За тривалу історію розвитку транспорту цей баланс зазнавав змін, але в останні десятиліття витрати на подолання простору зменшуються за рахунок вдосконалення технологій перевезень. Технології дозволяють підвищити пропускну здатність, швидкість та зменшити вартість

транспортування на суходільних, водних та повітряних транспортних коридорах, що означає зростання ефективності перевезень, що особливо важливо під час повномасштабної війни. Слід погодитися, що рушійною силою світової економіки є здатність транспортних систем перевозити великі обсяги вантажів і обслуговувати значну кількість пасажирів. Отже, на початку двадцятого століття географія транспорту фундаментально переосмислюється у зв'язку з глобальними, регіональними та місцевими проблемами.

Уряди країн розробляють стратегії щодо покращення транспортних систем, наприклад, у стратегічному плані Департаменту транспорту США на 2022-2026 фінансові роки [9] іде мова про інвестиції в безпеку транспорту; увага до оптимізації ремонту, реконструкції доріг, мостів та трубопроводів; покращення можливостей здорового та екологічно безпечного транспорту; анонсується перехід до нульових викидів; побудови національної мережі зарядних пристроїв для електромобілів; покращення інфраструктури портів та пунктів пропуску через державний кордон для забезпечення ефективних ланцюгів поставок.

В умовах російсько-української війни завдання розвитку транспортних мереж України повинне зосереджуватися на вирішенні низки важливих завдань, які спрямовані на різні аспекти спроможності України в оборонній, економічній та гуманітарній сферах, зокрема:

- забезпечення швидкого перевезення боєприпасів, військової техніки та військовослужбовців до зони бойових дій;
- організація безпечної евакуації цивільного населення із зони бойових дій, транспортування біженців та внутрішньо-переміщених осіб до місць тимчасового притулку;
- транспортування поранених до медичних установ для лікування та доставка лікарів, медичного обладнання, харчів, води та інших необхідних ресурсів;
- забезпечення комунікації між регіонами для відновлення економічної активності;
- проведення робіт з оптимізації та відновлення доріг та транспортної інфраструктури.

Таким чином, слід зазначити, що в умовах війни транспорт грає критичну роль для оборони, забезпеченні безпеки громадян та ефективного ведення господарства. Поточна ситуація повномасштабної війни в Україні потребує уточнення пріоритетів розвитку транспортної системи країни, зокрема, стосовно розвитку логістики перевезення вантажів, зокрема зміцнення експортного потенціалу. Ефективним інструментом для цього є використання геоінформаційного моделювання та баз геопросторових даних, проте, на жаль, ця тема досліджена недостатньо і потребує додаткових досліджень.

Метою роботи є огляд та узагальнення методів геоінформаційного аналізу та моделювання для завдань оптимізації транспортних мереж України в умовах збройної агресії. Для вирішення цієї мети сформульовані такі завдання:

- здійснити огляд проблем планування та оптимізації мереж автомобільних доріг;
- проаналізувати та узагальнити досвід геоінформаційного моделювання транспортних мереж;
- визначити алгоритми, що доречно використовувати для оптимізації мережі доріг.

Матеріали та методи. Методологічною основою роботи стали теорія політичної географії та картографії, методи геоінформаційного моделювання транспорту, наукові та організаційні засади створення і експлуатації національної інфраструктури геопросторових даних (НІГД). В якості доступних даних для експериментальних робіт, використано глобальні дані про мережу автомобільних доріг, зокрема «Набір даних із відкритим доступом до глобальних доріг» (gROADSv1), підготовлений Центром міжнародної інформаційної мережі наук про Землю – CIESIN [3], та Центром соціально-

економічних даних і програм NASA (SEDAC) [6], а також геоінформаційна система (ГІС) з відкритим кодом QGIS.

Виклад основного матеріалу. Вагомі емпіричні дані свідчать про те, що важливість транспорту зростає. Можна виділити наступні тенденції розвитку транспортних послуг з урахуванням окупації АР Крим та частини Донецької та Луганської областей, а також повномасштабної війни в Україні:

- Триває загальносвітовий тренд зростання попиту на перевезення різними видами транспорту, що розпочався у двадцятому столітті та характерний для перших десятиліть двадцять першого століття. Таке зростання транспортного попиту, пов'язане з індивідуальною (пасажирською), а також вантажною мобільністю. Зростання попиту на перевезення, що відбулося після подолання пандемії COVID-19 зумовлює більшу кількість пасажирів і вантажів, які перевозяться, а також більшої відстані, на яку вони перевозяться.

- Загальна тенденція зниження рівня витрат на транспортування вантажів та пасажирів. Навіть якщо кілька видів транспорту є дуже дорогими у експлуатації (наприклад, морські судна та авіаційний транспорт), витрати на транспортовану одиницю значно зменшилися за останні десятиліття. Це дозволило долати більші відстані та ще більше використовувати порівняльні переваги різниці ціни товарів завдяки подоланню простору. У результаті, не зважаючи на нижчі витрати, частка транспортних послуг в економіці залишається відносно постійною в часі.

- Розширення географії перевезень та складності транспортної інфраструктури. Ці дві тенденції, вочевидь, розширили вимоги до транспортної інфраструктури як кількісно, так і якісно. Щільність доріг, гаваней, аеропортів, телекомунікаційних мереж та трубопроводів значною мірою розширюється, щоб обслуговувати нові райони та збільшити пропускну здатність існуючих мереж. Таким чином, транспортна інфраструктура стає все важливішим компонентом землекористування, особливо в розвинених країнах.

- Тенденцією останніх десяти років, а особливо у період після початку повномасштабної війни в Україні є переорієнтація напрямків мобільності: повне припинення автомобільного та залізничного сполучення з Російською Федерацією та Білоруссю а також збільшення кількості та обсягів пасажирських та вантажних перевезень в напрямку західних партнерів України із залученням різноманітних видів транспорту. Нині довжина лінії фронту в Україні сягає близько 3,7 тисячі кілометрів (державний кордон з Росією, Білоруссю та невизнаною Придністровською Молдавською республікою) з них активна лінія оборони сягає 1,5 тисячі кілометрів.

На територіальну структуру транспортних мереж, вартість і можливість реалізації транспортних проектів впливають такі особливості ландшафтів, як рельєф місцевості (рівнини, хребти, гори та долини), гідрографія (річки, болота). Інфраструктура наземного транспорту зазвичай будується там, де на території розміщені найменші фізичні перешкоди, наприклад, на рівнинах, уздовж річкових долин, через зручні гірські перевали або, за необхідності, шляхом спорудження тунелів [7].

Ведучи мову про важливість автомобільного транспорту в умовах війни, слід погодитися з колективом авторів [1], які відзначають такі найголовніші напрями розвитку автомобільних доріг в Україні:

- дотримання в Україні вимог до транспортних коридорів і придорожньої інфраструктури та доведення якості автомобільних шляхів України до європейського рівня;

- забезпечення пріоритетного розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення;

- розвиток мережі сучасних доріг вищих категорій між усіма обласними центрами та великими промисловими вузлами;

- вдосконалення системи державного управління галуззю дорожнього господарства України;

- запровадження інформаційно-аналітичної системи управління дорожнім господарством.

Використання Геоінформаційних Систем (ГІС) та геодезичних технологій (лідарного знімання, аерофотознімання) для управління та планування транспортною системою країни є очевидним. Нижче розглянемо задачі які можуть виконувати ГІС:

- аналіз конфігурації мережі доріг, визначення їх характеристик та їх облік (ширина, тип дорожнього покриття, рух транспорту тощо);

- вибір оптимальних маршрутів транспортних перевезень; маршрутів перевезень За допомогою ГІС можна розраховувати оптимальні маршрути для транспортних засобів, враховуючи різні фактори, такі як відстань, час подорожі, дорожні умови, наявність об'єктів обслуговування та інші.

- моделювання руху окремих транспортних засобів (враховувати реальний час руху окремого транспортного засобу, припустимі швидкості руху на різних ділянках доріг та інші фактори для точного визначення оптимальних маршрутів.

- проектування конфігурації нових автомобільних доріг та реконструкції існуючих (детальний аналіз території для визначення оптимальних місць розташування нових доріг.

- моделювання взаємодії нових автомобільних доріг з наявною транспортною інфраструктурою, а також з населеними пунктами, промисловими зонами, природними об'єктами, визначити вплив нових доріг на навколишнє середовище.

- оцінка ефективності автомобільних доріг, враховуючи потенційний транспортний потік, час подорожі та інші параметри.

Проведемо огляд та аналіз досвіду моделювання транспортної інфраструктури та транспортних перевезень за допомогою ГІС та з використанням баз геопросторових даних, які широко застосовується в різних країнах.

Нині набуває популярності спільне використання ГІС та автоматизованих систем підтримки прийняття рішень (СППР). Колектив авторів [4] запропонували розрахувати варіанти маршрутів транспорту, використовуючи аналіз чинників: (1) оцінки придатності для кожного маршруту; (2) кошторисів будівництва; та (3) очікувані витрати на придбання землі. Вивчення балів придатності для кожного маршруту сприяли визначенню найбільш придатних місць для нової транспортної інфраструктури. В своїй докторській дисертації [8] запропонував методіку оптимізації маршрутів транспортування товарів на експорт з Ісландії засобами ГІС. Колектив авторів використав ГІС для завдань оптимізації перевезення небезпечних матеріалів [2].

Аналіз та узагальнення цих та інших публікацій дозволило визначити ключові аспекти геоінформаційного моделювання в дослідженнях транспортних мереж. Взагалі функціонал ГІС підтримує шість типів алгоритмів, які дозволяють виконувати аналіз транспортних мереж: (1) знаходити найкоротший маршрут у мережі між двома точками, (2) знаходити оптимальний маршрут враховуючи час проїзду через мережу певної конфігурації за допомогою наявного парку транспортних засобів, (3) визначення зони обслуговування навколо певного пункту обслуговування; (4) побудова та зображення на карті цих зон обслуговування для мережі пунктів; (5) розрахунок транспортної доступності; (6) аналіз міжрайонних транспортних зв'язків.

Розглянемо детальніше сутність цих задач.

1. *Прокладання оптимального маршруту* полягає у знаходженні найшвидшого, найкоротшого або найбільш економічного маршруту між двома заданими точками транспортної мережі, враховуючи різні умови руху: пошук необхідно проводити з урахуванням часу проходження по дугах, часу виконання поворотів у вузлах, а також з урахуванням допустимого напрямку руху в дугах.

2. *Задача комівояжера* - пошук найоптимальнішого маршруту для послідовного обходу заданого набору точок, з урахуванням найкоротших відстаней між ними (алгоритм перебирає різні варіанти порядку обходу цих пунктів).

3. *Пошук найближчих точок обслуговування* - визначення масиву найближчих точок обслуговування для заданої точки на мапі з використанням евклідової відстані, наприклад, автозаправними станціями або магазинами.

4. *Розрахунок зон обслуговування* - поділ території на мапі на певні частини, кожна з яких відповідає околу найближчої точки обслуговування з метою оптимізації обслуговування різних об'єктів (полігони, теселяції або декомпозиції Вороного, названі на честь видатного українського математика Георгія Вороного, або теселяції Діріхле, названі на честь німецького математика, Лежена Діріхле).

5. *Розрахунок транспортної доступності* - визначення мінімального часу, відстані або вартості подорожі від аналізованих об'єктів до обслуговуючих об'єктів, вказівка можливості проїзду. У цьому завданні передбачається, що на карті задано два точкових шари: один з аналізованими об'єктами (наприклад населеними пунктами на карті області), а інший – із деякими обслуговуючими об'єктами (наприклад районними центрами у областях).

6. *Аналіз міжрайонних транспортних зв'язків* - встановлення ступеня взаємозалежності та рівня транспортної забезпеченості різних транспортних районів або поселень відповідно до пересування мережами деякого певного виду транспорту.

Загалом, ГІС надає потужний інструментарій для комплексного аналізу, планування та оптимізації транспортної інфраструктури з урахуванням різноманітних територіальних та екологічних факторів.

Розробка та імплементація геоінформаційної моделі транспорту країни шляхом моделювання транспортних мереж передбачає етапи створення: а) фактологічних карт (наявні автомобільні транспортні мережі); б) оціночні карти (визначення ефективності перевезень вантажів тим або іншим маршрутом); в) карти варіантів оптимізації транспортних мереж (сценарне планування). Власне методологію робіт з геоінформаційного моделювання транспорту найповніше ілюструє схема планування створення ГІС, запропонована відомим фахівцем в галузі ГІС, Роджером Томлінсоном [10]:

1. Обговорення стратегічної цілі моделювання транспортних мереж.
2. Формулювання стратегії планування інформаційної системи.
3. Проведення технологічного семінару на який запрошуються зацікавлені сторони, насамперед, фахівці предметної області, що будуть використовувати систему.
4. Створення опису інформаційних продуктів, які пропонуються до створення.
5. Визначення сфери застосування (широти охоплення) системи.
6. Створення концептуальної структури даних.
7. Вибір логічної моделі даних.

8. Визначення системних вимог до інформаційної системи, що впроваджується в сферу управління.

9. Проведення аналізу витрат / вигод, перехідних процесів та ризиків.

10. Складання плану впровадження системи.

Доцент кафедри транспортних даних (Інститут транспортних досліджень Лідса та Інститут аналітики даних Лідса) Робін Лавлейс [5] зазначає, що основні етапи транспортного планування мають географічні компоненти. Географічні методи можуть доповнювати і в деяких випадках замінювати традиційне моделювання (рисунок 1).

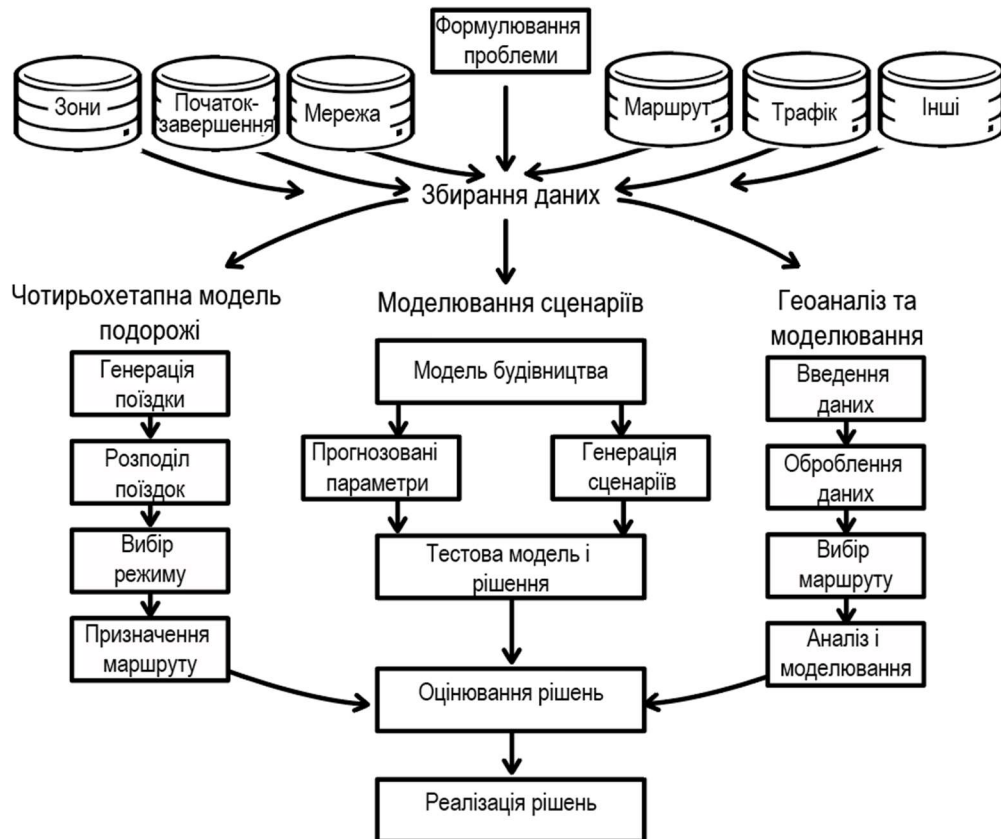


Рис.1.

Географічний аналіз і моделювання для процесу транспортного планування [5]

В цій же роботі [5] автор також наводить класифікацію та описує інструменти з відкритим кодом, які вже використовуються для вирішення проблем транспортного планування: інструменти інтерфейсу командного рядка (CLI); інструменти графічного інтерфейсу користувача (GUI), інструменти веб-інтерфейсу користувача (WUI), інтерфейси програмування веб-додатків (API).

Отже в залежності від масштабу дослідження та конкретних задач оптимізації транспортної системи, принципова схема та набір використаних інструментів може відрізнятися.

В ході робіт було здійснено апробацію застосування окремих функцій ГІС для моделювання транспортних мереж. Для експериментальних робіт було використано програмне забезпечення QGIS та плагін QNEAT3, написаний Клеменсом Раффлером на Python та

інтегрований у QGIS3 Processing Framework. Інструмент реалізує розширені алгоритми аналізу мереж, зокрема, розв'язання задачі *найкоротшого шляху* (рисунк 2), побудова *зон обслуговування* або багатокутників доступності у випадку обчислень руху транспорту вздовж існуючої мережі автомобільних доріг (Isochrone Area); та *обчислення матриці «Початок-Призначення»* також відомої як OD-Matrix (Origin-Destination-Matrix). Усі алгоритми плагіну використовують QGIS3 Python API, класи аналізу, написані мовою C++.

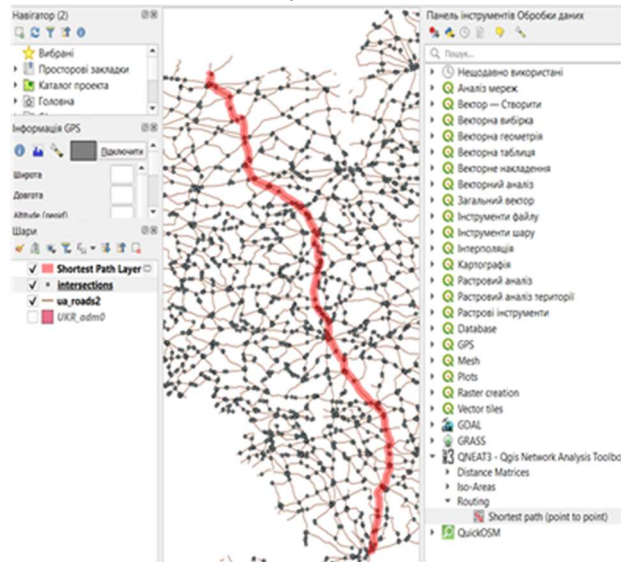


Рис. 2. Побудова найкоротшого шляху від Одеси до північного кордону України в програмному забезпеченні QGIS за допомогою плагіну QNEAT3

Це закладає позитивну основу з точки зору продуктивності алгоритму, оскільки важкі обчислення (наприклад, алгоритм Едсгера Дейкстри) виконуються за допомогою машинного коду C++.

Експериментальні роботи з моделювання транспортних мереж здійснено на масиві відкритих глобальних даних про мережу автомобільних доріг, зокрема «Набір даних глобальних доріг із відкритим доступом» (gROADSv1), підготовлений Центром міжнародної інформаційної мережі наук про Землю CIESIN [3], та Центром соціально-економічних даних і програм NASA (SEDAC) [6]. Слід відзначити, що відкриті дані, зібрані на основі дешифрування дистанційних зображень потребують верифікації. Порівняння використаного набору даних з даними про дорожню мережу з порталу відкритої карти вулиць (OSM) дозволило знайти окремі неточності в мережі. Використання верифікованих даних транспортної мережі в умовах конфлікту дозволить отримати більш якісні результати. Важливим завданням на перспективу є залучення до проекту географів та фахівців транспортної галузі, а також використання для аналізу численних показників територіальної організації транспорту (транспортної забезпеченості, доступності та ефективності використання транспортного потенціалу в регіонах).

Вважаємо, що будь які геоінформаційні моделі повинні враховувати поточний вплив воєнного конфлікту на транспортну інфраструктуру (ракетні обстріли морських портів та портової інфраструктури). Потребує уточнення перелік пунктів пропуску через державний кордон України, інформація про їх пропускну здатність, облаштування тощо. Важливою

складовою даних необхідним для створення адекватної просторової моделі транспортних мереж України є також морські та річкові порти, що дозволяють змоделювати мультимодальні (перевезення двома різними видами транспорту) та інтермодальні (система доставки вантажів у міжнародному сполученні кількома видами транспорту (за єдиним перевізним документом) системи транспортування. Це допоможе визначити вузли інтегрованих систем транспортування вантажів (в контейнерах на літаках, комбіноване наземно-водне перевезення, контейнерно-трейлерне перевезення, комбіноване автомобільно - залізничне перевезення).

Згодом до моделі можуть бути додані аеропорти як додаткові вузли інтегрованих систем транспортування вантажів.

Геоінформаційне моделювання є важливим інструментом визначення стратегій управління транспортними перевезеннями в умовах воєнного конфлікту та на віддалену перспективу.

Висновки

Розгляд та узагальнення масиву публікацій в сфері планування та оптимізації транспортних мереж, зокрема, мережі автомобільних доріг, дав можливість зрозуміти основні напрями підвищення ефективності перевезень до яких належить *зростання глобального попиту на транспортні перевезення, зниження рівня витрат на транспортування, розширення географії перевезень та складності транспортної інфраструктури, припинення транспортного сполучення України з Російською Федерацією й Білоруссю та інтенсифікація транспортного сполучення України з Європейськими країнами.*

Важливим способом подолання проблеми невідповідності існуючої конфігурації та пропускної здатності мережі автомобільних доріг України обставинам повномасштабної збройної агресії Російської Федерації проти України є застосування геоінформаційного моделювання.

Залучення ГІС та баз геопросторових даних здатні допомогти визначити оптимальну конфігурацію транспортних мереж держави. Також відзначимо досвід геоінформаційного моделювання для вирішення ряду актуальних задач в умовах війни: *прокладання оптимальних маршрутів для пасажирських та вантажних перевезень на основі оперативної інформації; вирішенні задачі комівояжера для логістики постачання військ; пошуку найближчих точок обслуговування для ремонту техніки; розрахунку та зображення на мапі зон обслуговування громадян у випадку надзвичайних ситуацій; розрахунку транспортної доступності центрів надання послуг та аналізу міжрайонних транспортних зв'язків.* Особливе місце в цьому контексті слід надати імітаційному моделюванню, яке дозволить розробити та порівняти сценарії розвитку мережі транспорту в сучасних умовах.

Експериментальні розробки з використанням глобального набору даних доріг із відкритим доступом та програмного забезпечення QGIS виявилися успішними, проте виявили аспекти проекту, які потребують доопрацювання (залучення експертів, уточнення і розширення бази геопросторових даних, використання ширшого переліку алгоритмів та показників).

Вважаємо, що перспективним є продовження дослідження з метою визначення переліку методів та алгоритмів придатних для оптимізації мережі автомобільних доріг України в період війни та після її завершення.

Перелік посилань

1. Гамеляк І. П. Про необхідність розбудови мережі швидкісних автомагістралей в Україні [Текст] / І. П. Гамеляк, А. М. Дмитриченко // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2018. № 2. С. 107-121.
2. Huang, B., Cheu, R. L., & Liew, Y. S. GIS and genetic algorithms for HAZMAT route planning with security considerations. *International Journal of Geographical Information Science*, 18(8), 2004 p. 769-787.
3. Global Roads Open Access Data Set, Version 1 (gROADSv1). Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University, and Information Technology Outreach Services. ITOS. University of Georgia. 2013.
4. Kim H. Y. et al. Optimizing high-speed rail routes using a Spatial Decision Support System (SDSS): the Texas Urban Triangle (TUT) case // *Journal of transport geography*. 2014. Т. 34. С. 194-201.
5. Lovelace R. Integrating geographic analysis in transport planning [preprint]. 2021. 26 p. available at <https://eprints.whiterose.ac.uk/153872/>
6. NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Palisades, New York: <https://doi.org/10.7927/H4VD6WCT>.
7. Snorrason, B. G. Optimizing transportation of forest seedlings for the Icelandic Forest Service (Doctoral dissertation), 2020. 67 p.
8. Tomlinson, R. F. Thinking about GIS: Geographic information system planning for managers (4th ed). Esri Press. 2011. 256 p.
9. Rodrigue J. P. The geography of transport systems. – Routledge, 2020. 284 p.
10. Strategic Plan. US Department of Transportation (Fiscal Year 2022-26) // 2022. WASHINGTON. 51 p.

THEORY AND METHODS OF GEOINFORMATION MODELING OF TRANSPORT NETWORKS IN THE CONDITIONS OF THE RUSSIAN-UKRAINIAN WAR

Dmytro Liashenko, Doctor of Geographical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of System Design of Transport Infrastructure Objects and Geodesy, National Transport University. Kyiv, Ukraine. e-mail: uageog@gmail.com, tel.+ 380673235684, <https://orcid.org/0000-0001-5588-0322>.

Summary. The paper explores the main methods of geographic information modeling of transportation networks. Studying the experience of predecessors has allowed identifying contemporary features shaping the development of transport, including increased demand for transportation, cost reduction, expansion of transport infrastructure, and safety requirements. It is determined that geographic information systems enable the application of optimization models to assess the actual state and efficiency of transport networks by comparing the time and cost expenditures for transporting a unit mass of cargo. The study highlights significant financial costs for transporting goods in the conditions of the Russian-Ukrainian war. The paper proposes key directions for optimizing the road network of Ukraine with the aim of enhancing transport efficiency.

Keywords: transport networks, automobile roads, geospatial data, national infrastructure of geospatial data, relief, geodetic methods, network analysis, optimization models

References

1. Hamelyak I. P. On the need to build a network of high-speed highways in Ukraine [Text] / I. P. Hamelyak, A. M. Dmytrychenko // Modern technologies, materials and constructions in construction. 2018. No. 2. P. 107-121.
2. Huang, B., Cheu, R. L., & Liew, Y. S. GIS and genetic algorithms for HAZMAT route planning with security considerations. International Journal of Geographical Information Science, 18(8), 2004 p. 769-787.
3. Global Roads Open Access Data Set, Version 1 (gROADSv1). Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University, and Information Technology Outreach Services. ITOS. University of Georgia. 2013.
4. Kim H. Y. et al. Optimizing high-speed rail routes using a Spatial Decision Support System (SDSS): the Texas Urban Triangle (TUT) case // Journal of transport geography. 2014. Т. 34. С. 194-201.
5. Lovelace R. Integrating geographic analysis in transport planning [preprint]. 2021. 26 p. available at <https://eprints.whiterose.ac.uk/153872/>
6. NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). Palisades, New York: <https://doi.org/10.7927/H4VD6WCT>.
7. Snorrason, B. G. Optimizing transportation of forest seedlings for the Icelandic Forest Service (Doctoral dissertation), 2020. 67 p.
8. Tomlinson, R. F. Thinking about GIS: Geographic information system planning for managers (4th ed). Esri Press. 2011. 256 p.
9. Rodrigue J. P. The geography of transport systems. – Routledge, 2020. 284 p.
10. Strategic Plan. US Department of Transportation (Fiscal Year 2022-26) // 2022. WASHINGTON. 51 p.

Дата надходження до редакції 06.11.2023