

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Географічний факультет
Кафедра геодезії та картографії

На правах рукопису
УДК [528.92+656] : 004.94

**КАРТОГРАФІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИРІШЕННЯ
ТРАНСПОРТНО-НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ ЗАСОБАМИ
ВЕБ-ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Галузь знань 10 – “Природничі науки”
Спеціальність 103 – “Науки про Землю”
Освітня програма – “Картографія, географічні інформаційні системи,
дистанційне зондування Землі”

Кваліфікаційна робота бакалавра
студента четвертого курсу
денного відділення
Монакова Данііла Сергійовича

Науковий керівник –
доктор географічних наук, професор
Бондаренко Едуард Леонідович

Допущено до захисту
Протокол засідання кафедри № 12 від 27 травня 2025 року
Завідувач кафедри проф. Людмила ДАЦЕНКО

Київ – 2025

РЕФЕРАТ

У кваліфікаційній роботі бакалавра розглянуто питання картографічного забезпечення вирішення транспортно-навігаційних задач засобами сучасних веб-ГІС-технологій. Мета роботи – дослідження теоретичних основ та розробка методичних підходів до ефективного застосування зазначених технологій.

Проведено аналіз теоретико-методологічних аспектів, що включав огляд ключових задач, нормативно-правової бази, вивчення методологічних підходів (зокрема, мережевий аналіз для оптимізації маршрутів) та перспектив розвитку.

Досліджено інформаційне, програмне та технічне забезпечення: систематизовано джерела даних, обґрунтовано функціональні вимоги до веб-ГІС та проведено огляд програмних рішень з акцентом на можливості ArcGIS Online.

Розроблено методику практичної реалізації функціонування веб-ГІС у вигляді узагальненого алгоритму. Практичне дослідження з використанням платформи ArcGIS Online підтвердило її ефективність для вирішення прикладних логістичних задач, включаючи побудову оптимальних маршрутів для малої компанії та демонстрацію логістики великої торговельної мережі.

Наведені у роботі приклади додатково ілюструють можливості ArcGIS Online для вирішення різноманітних транспортно-навігаційних задач, підтверджуючи ефективність запропонованих підходів.

Ключові слова: веб-ГІС, транспортно-навігаційні задачі, картографічне забезпечення, ArcGIS Online, мережевий аналіз, оптимізація маршрутів, геоінформаційні технології.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНА ОСНОВА СТВОРЕННЯ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІС ДЛЯ ВИКОНАННЯ ТРАНСПОРТНО- НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ.....	8
1.1. Загальний огляд комплексу транспортно-навігаційних задач для їх виконання за допомогою функціоналу геоінформаційних систем	8
1.2. Характеристика нормативного забезпечення для управління транспортними засобами.....	11
1.3. Методологічні підходи до реалізації транспортно-навігаційних задач	13
1.4. Вивчення досвіду розроблення та впровадження ГІС для вирішення транспортно-навігаційних задач.....	16
1.5. Шляхи та перспективи розвитку транспортно-навігаційних ГІС	19
РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНЕ, ПРОГРАМНЕ ТА ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІС ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ТРАНСПОРТНО- НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ.....	22
2.1. Джерела даних для забезпечення функціонування ГІС при вирішенні транспортно-навігаційних задач.....	22
2.2. Систематизація інформаційного забезпечення функціонування ГІС для вирішення транспортно-навігаційних задач.....	26
2.3. Обґрунтування функціоналу транспортно-навігаційних ГІС.....	28
2.4. Огляд та порівняння функціоналу програмного забезпечення, придатного для побудови транспортно-навігаційної ГІС.....	32
2.5. Характеристика необхідного технічного забезпечення для реалізації задач транспортної навігації	37
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІС ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ТРАНСПОРТНО-НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ	41
3.1. Функціонал ArcGis Online, як програмного забезпечення для вирішення транспортно-навігаційних задач.....	41

3.2. Алгоритм практичної реалізації функціонування ГІС для вирішення транспортно-навігаційних задач.....	44
3.3. Приклади транспортно-навігаційних задач засобами ГІС.....	48
3.4. Практичне дослідження.....	51
ВИСНОВКИ.....	61
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Сучасний світ характеризується стрімким зростанням обсягів перевезень, ускладненням логістичних ланцюгів та підвищенням вимог до ефективності й безпеки транспортних процесів. В умовах глобалізації, урбанізації та цифровізації економіки, вирішення транспортно-навігаційних задач стає ключовим фактором конкурентоспроможності підприємств та сталого розвитку територій. Від оперативного планування маршрутів доставки та моніторингу руху транспорту до стратегічного аналізу транспортних потоків та розвитку інфраструктури – усі ці завдання потребують сучасних інструментів обробки та візуалізації просторової інформації.

Геоінформаційні системи (ГІС) зарекомендували себе як потужний інструментарій для вирішення широкого спектра задач, пов'язаних з просторовими даними. Однак саме розвиток веб-ГІС технологій відкрив нові горизонти для картографічного забезпечення транспортно-навігаційних процесів. Веб-ГІС забезпечують кросплатформеність, легкий доступ до даних та інструментів аналізу через інтернет-браузер, можливість роботи з даними в режимі реального часу та інтеграцію з іншими інформаційними системами. Це робить їх особливо привабливими для логістичних компаній, служб доставки, громадського транспорту, екстрених служб та органів державного управління, відповідальних за транспортну інфраструктуру.

В Україні питання оптимізації транспортної системи набуває особливої актуальності у зв'язку з потребами післявоєнного відновлення, інтеграцією до європейських транспортних мереж та необхідністю підвищення ефективності внутрішніх перевезень. Розробка та впровадження ефективних рішень на основі веб-ГІС для транспортної галузі є важливим науково-практичним завданням. Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері ГІС та транспорту, аспекти саме картографічного забезпечення вирішення транспортно-навігаційних задач

засобами веб-ГІС технологій потребують подальшого системного вивчення та узагальнення.

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є дослідження теоретичних основ та розробка методичних підходів до картографічного забезпечення вирішення транспортно-навігаційних задач засобами сучасних веб-ГІС технологій.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання дослідження**:

1. Проаналізувати теоретико-методологічні основи картографічного забезпечення транспортно-навігаційних задач, включаючи огляд ключових задач, ролі ГІС-технологій та основних методологічних підходів до їх вирішення.

2. Охарактеризувати нормативно-правове поле, що регулює управління транспортними засобами та використання геопросторових даних в Україні.

3. Вивчити практичний досвід впровадження та визначити перспективи розвитку транспортно-навігаційних ГІС на основі веб-технологій.

4. Систематизувати вимоги до інформаційного забезпечення транспортно-навігаційних веб-ГІС, включаючи визначення основних типів та джерел даних, а також підходів до їх організації та управління якістю.

5. Обґрунтувати необхідний функціонал, провести огляд програмного забезпечення, придатного для створення транспортно-навігаційних веб-ГІС, та охарактеризувати вимоги до відповідного технічного забезпечення.

6. Розробити та продемонструвати на прикладах методику практичного застосування веб-ГІС платформи ArcGIS Online для вирішення типових транспортно-навігаційних задач.

7. Виконати практичне дослідження з використанням платформи ArcGIS Online для демонстрації прорахунку та побудови маршрутів за певною задачею та критеріями.

Об'єктом дослідження є транспортно-навігаційні задачі у різних сферах діяльності.

Предметом дослідження є картографічне забезпечення процесу вирішення транспортно-навігаційних задач із застосуванням веб-ГІС технологій.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплекс загальнонаукових та спеціальних методів дослідження, зокрема: аналіз та синтез (для вивчення наукової літератури та досвіду впровадження ГІС), системний аналіз (для визначення структури та функцій транспортно-навігаційних ГІС), порівняльний аналіз (при огляді програмного забезпечення), методи картографічного моделювання та ГІС-аналізу.

Інформаційною базою дослідження слугували наукові публікації вітчизняних та зарубіжних авторів у фахових виданнях, монографії, матеріали науково-практичних конференцій, нормативно-правові акти України, технічна документація розробників програмного забезпечення ГІС, інформаційні ресурси мережі Інтернет.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота бакалавра складається зі вступу, трьох розділів, висновків, переліку використаної літератури. У першому розділі розглядаються теоретико-методологічні основи застосування ГІС для транспортно-навігаційних задач. Другий розділ присвячено аналізу інформаційного, програмного та технічного забезпечення таких систем. У третьому розділі розробляється методика практичної реалізації, наводяться приклади вирішення транспортно-навігаційних задач засобами веб-ГІС на платформі ArcGIS Online та на цій же платформі виконується практичне дослідження.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНА ОСНОВА СТВОРЕННЯ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІС ДЛЯ ВИКОНАННЯ ТРАНСПОРТНО-НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ

1.1. Загальний огляд комплексу транспортно-навігаційних задач для їх виконання за допомогою функціоналу геоінформаційних систем

Транспортна система є однією з ключових інфраструктур будь-якої сучасної економіки, забезпечуючи переміщення людей та вантажів. Ефективне управління цією системою неможливе без вирішення широкого комплексу **транспортно-навігаційних задач**. Ці задачі охоплюють різні рівні управління (від стратегічного планування до оперативного контролю) та сфери застосування (логістика, пасажирські перевезення, екстрені служби, особиста навігація тощо).

Геоінформаційні системи (ГІС) стали невід'ємним інструментом для вирішення цих задач, оскільки вони дозволяють працювати з просторово розподіленою інформацією, яка є основою для будь-яких транспортних процесів. ГІС ефективні в усіх галузях, де здійснюються облік і управління територією та об'єктами на ній, до яких належать і транспортна інфраструктура та рухомі об'єкти [1].

Можна виділити такі основні групи транспортно-навігаційних задач, для вирішення яких ефективно застосовується функціонал ГІС:

1. Задачі маршрутизації та навігації:

– **Побудова оптимальних маршрутів:** Це класична задача пошуку найкращого шляху між двома або більше точками за певними критеріями (найкоротший, найшвидший, найдешевший, з урахуванням обмежень руху для певних видів транспорту, уникнення платних доріг тощо). ГІС використовують для цього інструменти **мережевого аналізу** (network analysis), що базуються на

відповідних алгоритмах пошуку шляху на графах дорожньої мережі. Веб-ГІС дозволяють враховувати дані про трафік у реальному часі.

– **Навігаційне супроводження (ведення по маршруту):** Надання покрокових інструкцій водію або пішоходу для руху за побудованим маршрутом. ГІС забезпечують візуалізацію маршруту на карті, голосові підказки, автоматичне перепрокладання маршруту при відхиленні.

– **Задача комівояжера (TSP) та задача маршрутизації транспорту (VRP):** Оптимізація маршрутів для відвідування множини точок (наприклад, доставки товарів) з поверненням у вихідний пункт, мінімізуючи загальний пробіг або час. Сучасні ГІС мають спеціалізовані інструменти та алгоритми для вирішення цих складних оптимізаційних задач.

2. Задачі моніторингу та управління рухом:

– **Моніторинг рухомих об'єктів:** Відстеження місцезнаходження транспортних засобів у реальному часі за допомогою GPS/ГЛОНАСС та інших супутникових систем. Веб-ГІС дозволяють візуалізувати поточне положення, швидкість, напрямок руху транспорту на карті, створювати "геозони" для контролю в'їзду/виїзду.

– **Управління парком транспортних засобів (Fleet Management):** Комплексна задача, що включає моніторинг, планування завдань, контроль витрат палива, аналіз стилю водіння, формування звітності. ГІС часто є ядром таких систем, інтегруючи просторові дані з атрибутивною інформацією про транспортні засоби, водіїв та завдання.

– **Аналіз та прогнозування трафіку:** Збір даних про інтенсивність руху, виявлення заторів, моделювання транспортних потоків для прогнозування ситуації на дорогах та оптимізації роботи світлофорів. Веб-ГІС дозволяють інтегрувати дані з різних джерел (датчики, камери, мобільні додатки) та відображати актуальну дорожню обстановку.

3. Задачі аналізу доступності та інфраструктури:

– **Аналіз зон обслуговування (Service Area Analysis):** Визначення території, яка може бути досягнута від певного об'єкта (наприклад, складу,

пожежної частини, лікарні) за заданий час або відстань. Це важливо для планування розміщення об'єктів інфраструктури, оцінки ризиків, визначення зон доставки. ГІС розраховують такі зони на основі аналізу дорожньої мережі.

– **Аналіз транспортної доступності:** Оцінка легкості доступу до певних об'єктів або територій для різних груп населення з використанням різних видів транспорту (громадський, особистий).

– **Інвентаризація та управління транспортною інфраструктурою:** Створення та ведення баз даних про дороги, мости, зупинки громадського транспорту, АЗС, парковки та інші об'єкти. ГІС дозволяють зберігати їх місцезнаходження, характеристики, стан, планувати ремонти та розвиток.

4. Задачі підтримки прийняття рішень:

– **Вибір оптимального місця розташування (Location-Allocation):** Визначення найкращих місць для розміщення нових об'єктів (наприклад, логістичних хабів, магазинів, зупинок) з урахуванням потреби в них, наявності клієнтів чи ресурсів та транспортної доступності. ГІС пропонують відповідні аналітичні інструменти для вирішення таких задач.

– **Моделювання наслідків надзвичайних ситуацій:** Оцінка впливу аварій, стихійних лих на транспортну мережу, планування шляхів евакуації та об'їзду.

Функціонал сучасних ГІС, особливо веб-ГІС, надає потужні інструменти для вирішення зазначених задач. Ключовими можливостями є:

– Зберігання та управління великими обсягами просторових (карти, дорожні графи, точки інтересу) та атрибутивних (характеристики об'єктів, розклади, дані моніторингу) даних.

– Просторовий аналіз: Мережевий аналіз, аналіз близькості, оверлейні операції, геокодування, побудова зон доступності.

– Візуалізація: Представлення даних у вигляді інтерактивних карт, схем, графіків, що полегшує сприйняття інформації та прийняття рішень.

– Інтеграція: Можливість поєднання даних з різних джерел, включаючи дані в реальному часі (GPS, датчики трафіку), та інтеграції з іншими корпоративними системами (ERP, CRM).

– Доступність: Веб-ГІС забезпечують доступ до даних та інструментів через стандартні веб-браузери на різних пристроях.

Таким чином, ГІС виступають як інтегруюча платформа, що дозволяє комплексно підходити до вирішення транспортно-навігаційних задач, підвищуючи ефективність, безпеку та керованість транспортних систем [1].

1.2. Характеристика нормативного забезпечення для управління транспортними засобами

Функціонування транспортної галузі та управління транспортними засобами в Україні регулюється комплексом нормативно-правових актів та стандартів. Це законодавче поле створює основу для впровадження сучасних технологій, включаючи геоінформаційні системи, для вирішення транспортно-навігаційних задач, хоча прямі вимоги щодо використання саме веб-ГІС можуть бути не завжди явно прописані.

Основоположним документом є **Закон України "Про транспорт"** [2]. Він визначає загальні правові, економічні та організаційні засади діяльності транспорту, вимоги до транспортних засобів щодо безпеки, охорони праці та екології, необхідність їх відповідності державним стандартам та наявності сертифікатів. Закон також встановлює обов'язковість дотримання правил безпеки руху, санітарних та екологічних вимог усіма учасниками транспортного процесу [2].

Більш детально діяльність автомобільного транспорту регламентується **Законом України "Про автомобільний транспорт"** [3]. Цей закон регулює відносини між перевізниками, замовниками транспортних послуг, органами влади, визначає вимоги до ліцензування діяльності з перевезення пасажирів та вантажів, права та обов'язки учасників перевізного процесу. Хоча закон

безпосередньо не містить універсальних вимог щодо обов'язкового оснащення всіх транспортних засобів системами навігації чи моніторингу, такі вимоги можуть впливати з ліцензійних умов для певних видів перевезень (наприклад, пасажирських, небезпечних вантажів) або встановлюватися окремими підзаконними актами для специфічних завдань.

Безпека руху на дорогах регулюється **Законом України "Про дорожній рух"** [4] та деталізується у **Правилах дорожнього руху**. Ці документи встановлюють порядок руху транспортних засобів, права та обов'язки водіїв і пішоходів, вимоги до технічного стану транспортних засобів. Обов'язковий технічний контроль, передбачений цими законами [4, 5], також є елементом забезпечення безпеки експлуатації транспорту.

Важливим кроком для розвитку ГІС-технологій в Україні, зокрема у транспортній сфері, стало прийняття **Закону України "Про Національну інфраструктуру геопросторових даних" (НІГД)** [5]. Цей закон спрямований на забезпечення створення, функціонування та розвитку інфраструктури геопросторових даних, встановлення правових основ для інтеграції, зберігання, оприлюднення та ефективного використання геопросторових даних та метаданих різними суб'єктами. Функціонування НІГД, порядок доступу до даних та забезпечення їх інтероперабельності деталізуються відповідними постановами Кабінету Міністрів України, зокрема Постановою № 532 від 26 травня 2021 року [6]. Аналіз поточного стану та перспектив розвитку національної інфраструктури геопросторових даних в Україні висвітлено у даній науковій праці [7]. Створення НІГД та національного геопорталу є ключовим для забезпечення транспортних ГІС якісними, актуальними та стандартизованими базовими геопросторовими даними (дорожня мережа, адміністративний устрій, об'єкти інфраструктури тощо).

Стандартизація у сфері геоінформатики та транспорту також відіграє важливу роль. В Україні діють національні стандарти (ДСТУ), гармонізовані з міжнародними (ISO) та європейськими (EN). До ключових стандартів належать ті, що стосуються географічної інформації та метаданих, зокрема серія ДСТУ

на основі ISO 19100, наприклад, ДСТУ ISO 19101:2009 "Географічна інформація. Еталонна модель" [8]. Вони забезпечують принципи інтероперабельності даних в рамках НІГД. Окремо розвиваються стандарти для **інтелектуальних транспортних систем (ІТС)**, такі як серія ДСТУ EN 16157 (DATEX II), що регламентують формати обміну даними для управління дорожнім рухом, інформування про поточну ситуацію, паркування тощо [9]. Це створює технічну базу для інтеграції різних транспортних веб-сервісів.

Окремі аспекти використання систем моніторингу можуть регулюватися відомчими нормативними актами. Наприклад, Наказ Мінінфраструктури № 966 від 05.09.2024 р. затверджує Порядок організації міжнародних пасажирських перевезень, де можуть встановлюватися вимоги до контролю та звітності перевізників [10], що опосередковано стимулює використання відповідних технологій.

При впровадженні систем моніторингу транспорту, які передбачають збір даних про місцезнаходження транспортних засобів та/або водіїв, необхідно дотримуватися вимог **Закону України "Про захист персональних даних"** [11], забезпечуючи належний захист та законність обробки таких даних.

Таким чином, нормативне забезпечення України створює загальні рамки для функціонування транспорту, безпеки руху та використання геопросторових даних. Хоча прямих вимог щодо повсюдного використання веб-ГІС для навігації та управління транспортом може не бути, законодавство стимулює стандартизацію даних (через НІГД та ДСТУ), підвищення безпеки та ефективності перевезень, що об'єктивно сприяє впровадженню сучасних геоінформаційних технологій.

1.3. Методологічні підходи до реалізації транспортно-навігаційних задач

Реалізація транспортно-навігаційних задач засобами ГІС спирається на низку специфічних методологічних підходів, які дозволяють моделювати,

аналізувати та оптимізувати транспортні процеси у просторовому вимірі. Ці підходи включають роботу з мережевими моделями даних, просторову оптимізацію, інтеграцію даних у реальному часі та використання специфічних функцій геоінформаційного аналізу.

Центральним методологічним підходом для вирішення задач, пов'язаних із рухом та доступністю, є **мережевий аналіз (Network Analysis)** [13]. Цей підхід базується на представленні транспортної інфраструктури (автомобільних доріг, залізниць, вулиць, пішохідних шляхів) у вигляді **транспортної мережі (графу)**. Така мережа складається з ребер (відрізків доріг) та вузлів (перехресть), яким присвоюються атрибути, що характеризують умови руху: довжина, дозволена швидкість, тип покриття, наявність обмежень (односторонній рух, заборона проїзду для певного транспорту), вартість проїзду (імпеданс) тощо. На основі цієї моделі ГІС дозволяє вирішувати такі типові задачі:

- **Пошук оптимального маршруту:** Знаходження найкоротшого або найшвидшого шляху між двома чи більше точками з урахуванням заданих критеріїв та обмежень [12].

- **Побудова зон обслуговування (Service Areas):** Визначення області, доступної від певного об'єкта за заданий час або відстань руху по мережі.

- **Пошук найближчого об'єкта (Closest Facility):** Знаходження найближчого до заданої точки об'єкта інфраструктури (наприклад, лікарні, АЗС, зупинки) по транспортній мережі.

- **Побудова матриці кореспонденцій (OD Cost Matrix):** Розрахунок вартості (часу, відстані) переміщення між усіма парами точок "відправлення-призначення".

- **Вирішення задачі маршрутизації транспорту (Vehicle Routing Problem - VRP):** Оптимізація маршрутів для одного або декількох транспортних засобів, які мають відвідати множину точок (клієнтів, пунктів доставки) з мінімізацією сумарного пробігу, часу або витрат [14]. Це складна

оптимізаційна задача, для вирішення якої в ГІС застосовуються евристичні алгоритми.

– **Вирішення задачі розміщення-розподілу (Location-Allocation):**

Визначення оптимальних місць для розміщення нових об'єктів обслуговування (складів, магазинів, сервісних центрів) та розподілу зон попиту між ними з метою мінімізації відстаней або максимізації охоплення [13, 15].

Важливим підготовчим етапом для багатьох транспортних задач є **геокодування (Geocoding)** – процес перетворення текстових адрес або назв місць у географічні координати на карті, та **зворотне геокодування (Reverse Geocoding)** – визначення адреси за координатами. Це дозволяє точно локалізувати пункти відправлення, призначення, клієнтів та об'єкти інфраструктури.

Окрім мережевого аналізу, використовуються й інші методи **просторового аналізу**, такі як аналіз щільності (наприклад, для виявлення зон концентрації ДТП), просторова інтерполяція (для моделювання параметрів, що змінюються у просторі, наприклад, рівня забруднення від транспорту), аналіз видимості (при плануванні розміщення дорожніх знаків або камер спостереження).

Моделювання даних у транспортних ГІС також має свою специфіку. Окрім традиційних векторних моделей (точки, лінії, полігони), для представлення геоданих можуть використовуватися об'єктно-орієнтовані моделі та моделі польових вишукувань, що дозволяють більш повно описувати складні транспортні об'єкти та їх взаємозв'язки [1].

Сучасні, особливо **веб-ГІС**, активно використовують методологію **інтеграції даних у реальному часі**. Це включає обробку потокових даних від GPS-трекерів транспортних засобів, датчиків трафіку, мобільних додатків користувачів для відображення актуальної дорожньої ситуації, оперативного моніторингу та коригування маршрутів [16]. Для цього використовуються програмні інтерфейси (API), веб-сервіси та технології обробки великих даних.

Методологія **веб-ГІС** передбачає використання клієнт-серверної архітектури, де дані та складні аналітичні функції можуть бути зосереджені на сервері (часто хмарному), а користувачі взаємодіють із системою через веб-браузери або мобільні додатки. Використання стандартизованих веб-сервісів (OGC WMS, WFS, WMTS, а також спеціалізованих API для маршрутизації, геокодування) забезпечує інтеоперабельність та можливість інтеграції транспортних ГІС з іншими інформаційними системами підприємства.

Отже, методологічна основа реалізації транспортно-навігаційних задач у ГІС є комплексною і включає потужні інструменти мережевого аналізу, просторової оптимізації, геокодування, роботи з даними реального часу та специфічні підходи до моделювання даних, що посилюються можливостями сучасних веб-технологій.

1.4. Вивчення досвіду розроблення та впровадження ГІС для вирішення транспортно-навігаційних задач

Аналіз практичного досвіду розроблення та впровадження геоінформаційних систем є важливим для розуміння реальних переваг, викликів та тенденцій використання ГІС-технологій у транспортній сфері. Досвід накопичено як в Україні, так і за кордоном, хоча деталізовані публічні описи українських комерційних впроваджень є більш обмеженими порівняно зі світовою практикою.

Досвід в Україні:

Одним із найбільш видимих для кінцевих користувачів прикладів застосування веб-ГІС у транспорті є системи інформування про рух громадського транспорту. Популярний сервіс **EasyWay** [17] надає користувачам у багатьох містах України (а також за кордоном) можливість пошуку оптимальних маршрутів, перегляду схем руху та розкладів, а також відстеження положення транспортних засобів у реальному часі на карті за даними GPS (де це доступно та дозволено з міркувань безпеки). Подібні

функції часто інтегровані у міські цифрові застосунки, наприклад, у відповідний модуль застосунку **"Київ Цифровий"**, що також використовує веб-картографію та дані реального часу.

Великі логістичні оператори, такі як **"Нова Пошта"** чи **"Укрпошта"**, хоч і не публікують детальних кейс-стаді своїх внутрішніх систем, безперечно використовують складні ГІС-рішення для оптимізації логістики. Це включає планування маршрутів доставки, управління кур'єрами, вибір оптимального розташування відділень та поштоматів, аналіз зон обслуговування – задачі, ефективно вирішення яких неможливе без геоінформаційних технологій.

Державне агентство автомобільних доріг України **"Укравтодор"** та служби автомобільних доріг в областях також впроваджують елементи ГІС для управління дорожнім господарством, зокрема для створення цифрових паспортів доріг, моніторингу стану покриття, планування ремонтів та обліку об'єктів дорожньої інфраструктури, хоча комплексні публічні системи можуть перебувати на стадії розробки або мати обмежений доступ.

Загалом, український досвід демонструє активне використання веб-ГІС для інформування громадян та потенційно високий рівень застосування ГІС у приватній логістиці, тоді як у державному секторі управління інфраструктурою системи поступово розвиваються.

Міжнародний досвід:

Світова практика значно багатша на документовані приклади масштабних та ефективних ГІС-рішень у транспорті.

– **Логістика та доставка:** Яскравим прикладом є система **ORION (On-Road Integrated Optimization and Navigation)** компанії **UPS** [18]. Ця система, що базується на ГІС-алгоритмах, оптимізує тисячі маршрутів доставки щохвилини, враховуючи величезну кількість факторів. Впровадження **ORION** дозволило **UPS** суттєво скоротити пробіг транспортних засобів (на 6-8 миль на маршрут), зекономити мільйони галонів палива (близько 10 млн на рік) та отримати щорічну економію в сотні мільйонів доларів [18].

– **Громадський транспорт:** Багато транспортних адміністрацій великих міст (наприклад, **Transport for London (TfL)** у Лондоні) використовують ГІС для широкого спектра завдань: планування та оптимізація маршрутної мережі, аналіз пасажиропотоків, управління рухомим складом через інтеграцію з системами автоматичного визначення місцезнаходження транспортних засобів (AVL), інформування пасажирів через веб-сайти та мобільні додатки, диспетчеризація транспорту для людей з обмеженими можливостями, координація дій при надзвичайних ситуаціях [19].

– **Управління дорожнім рухом:** Центри управління дорожнім рухом у багатьох країнах інтегрують ГІС для візуалізації та аналізу даних з камер, детекторів транспорту, даних реального часу [20, 10]. Це дозволяє оперативно реагувати на інциденти, керувати світлофорами, інформувати водіїв через змінні інформаційні знаки та навігаційні системи, аналізувати "вузькі місця" та планувати заходи для покращення трафіку.

– **Управління інфраструктурою:** Дорожні агенції активно використовують ГІС, зокрема **мобільні ГІС-додатки**, для збору даних про стан доріг, мостів, дорожніх знаків та інших активів безпосередньо в полі, що підвищує точність та оперативність оновлення баз даних [21].

– **Технологічні платформи:** Успіх багатьох сучасних транспортних сервісів (від служб таксі та каршерінгу до систем доставки "останньої милі") значною мірою базується на використанні потужних геолокаційних платформ та веб-ГІС, таких як **Esri ArcGIS** [22], **Google Maps Platform**, **Mapbox** [23], **HERE Technologies**, які надають базові карти, інструменти маршрутизації, геокодування та інші API для розробників. Також активно використовуються відкриті дані, зокрема **OpenStreetMap**, як основа для багатьох транспортних додатків.

Вивчення досвіду показує глобальну тенденцію до переходу на веб- та хмарні ГІС-рішення в транспорті, зростання важливості даних реального часу, фокус на задачах оптимізації та інтеграції ГІС з іншими корпоративними та міськими системами. Водночас рівень впровадження та функціональність

систем можуть суттєво відрізнятися залежно від країни, міста та конкретного підприємства.

1.5. Шляхи та перспективи розвитку транспортно-навігаційних ГІС

Транспортно-навігаційні геоінформаційні системи перебувають у стані безперервного розвитку, що зумовлено як загальним технологічним прогресом, так і зростаючими вимогами до ефективності, безпеки та сталості транспортних систем. Майбутнє цих ГІС визначатиметься поглибленням інтеграції з новітніми технологіями та розширенням їх аналітичних та прогностичних можливостей.

Основними шляхами та перспективами розвитку транспортно-навігаційних ГІС є:

1. Інтеграція зі штучним інтелектом (AI) та машинним навчанням (ML): Це один із ключових трендів [24]. AI/ML дозволяють перетворити ГІС з інструментів візуалізації та базового аналізу на потужні прогностичні та оптимізаційні платформи. Очікується розвиток:

- Більш точних моделей **прогнозування трафіку** та часу прибуття, що враховують не лише поточні дані, а й історичні патерни та зовнішні фактори.
- **Інтелектуальної оптимізації маршрутів** у реальному часі, що адаптується до динамічно змінюваних умов.
- **Автоматизованого аналізу великих масивів транспортних даних** для виявлення прихованих закономірностей, вузьких місць, причин аварійності.
- **Предиктивного обслуговування** транспортної інфраструктури та рухомого складу на основі аналізу даних про їх стан.
- **Автоматизованого розпізнавання об'єктів** на аеро- та космічних знімках, даних LiDAR для швидкого оновлення карт [27].

2. Інтеграція з Інтернетом речей (IoT): Транспортні засоби, елементи інфраструктури (світлофори, паркувальні місця, дорожні датчики) та персональні пристрої користувачів стають джерелами величезних потоків геопросторових даних у реальному часі. ГІС виступатимуть як платформа для інтеграції, обробки та візуалізації цих даних [24], забезпечуючи безпрецедентний рівень ситуаційної обізнаності та можливостей для динамічного управління (V2X - Vehicle-to-Everything).

3. Аналітика великих даних (Big Data): Зростаючі обсяги даних від IoT, мобільних пристроїв, транзакційних систем потребують застосування методів Big Data аналітики в ГІС [25]. Це дозволить не лише реагувати на поточні події, а й проводити глибокий аналіз довгострокових тенденцій, оптимізувати транспортні мережі на основі фактичного попиту, розробляти персоналізовані транспортні послуги [25].

4. Підтримка автономного транспорту: Розвиток безпілотних автомобілів ставить нові вимоги до картографічного забезпечення. Ключову роль відіграватимуть **високоточні цифрові карти (HD Maps)**, що містять детальну інформацію про геометрію дороги, дорожню розмітку, знаки, світлофори та інші об'єкти з сантиметровою точністю [26]. ГІС-платформи будуть необхідні для створення, оновлення, валідації та розповсюдження таких карт, а також для управління парком автономних транспортних засобів та моделювання їх взаємодії.

5. Розвиток 3D та 4D ГІС: Для навігації та аналізу в складних міських умовах (багаторівневі розв'язки, тунелі, щільна забудова) стає недостатньо двовимірних карт. Перспективним є перехід до **тривимірних (3D) моделей** міст та транспортної інфраструктури [24, 27]. Додавання **часового виміру (4D ГІС)** дозволить краще моделювати та аналізувати динамічні процеси, такі як зміна транспортних потоків протягом доби або еволюція транспортної мережі. Розвиватимуться також технології **внутрішньої навігації (Indoor Navigation)** для великих транспортних вузлів (аеропорти, вокзали).

6. Хмарні та мобільні технології: Продовжиться міграція ГІС-рішень у **хмару**, що забезпечує масштабованість, доступність та зниження витрат на інфраструктуру [24]. Розвиватимуться **мобільні ГІС-додатки** як для кінцевих користувачів (навігація, інформування), так і для фахівців (збір даних у полі, моніторинг, управління завданнями), з розширенням функцій офлайн-роботи та доповненої реальності (AR) [24].

7. Покращення якості та доступності даних: Удосконалення технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), розвиток **технологій захоплення реальності (Reality Capture)**, таких як LiDAR та мобільне сканування [27], забезпечать створення більш точних, детальних та актуальних базових карт. Важливу роль продовжать відігравати **краудсорсингові дані** (наприклад, OpenStreetMap, Waze) та розвиток **національних інфраструктур геопросторових даних** для забезпечення доступу до відкритих даних [24].

8. Сталий розвиток та "зелена" логістика: ГІС все активніше використовуватимуться для вирішення екологічних проблем транспорту: оптимізація маршрутів для мінімізації викидів CO₂, планування інфраструктури для електротранспорту (зарядні станції), аналіз доступності громадського транспорту та умов для велоруку та пішоходів.

9. Цифрові двійники (Digital Twins): Перспективним напрямком є створення цифрових двійників транспортних систем міст або регіонів [24, 9] – динамічних віртуальних моделей, що інтегрують ГІС, дані реального часу від IoT та інструменти моделювання. Вони дозволять тестувати різні сценарії розвитку інфраструктури, управляти транспортними потоками та реагувати на інциденти в інтерактивному режимі.

Отже, майбутнє транспортно-навігаційних ГІС пов'язане з їх перетворенням на інтелектуальні, інтегровані, багатовимірні системи, що працюють з великими даними в реальному часі та здатні не лише відображати, а й прогнозувати та оптимізувати транспортні процеси, роблячи їх більш ефективними, безпечними та сталими.

РОЗДІЛ 2.

ІНФОРМАЦІЙНЕ, ПРОГРАМНЕ ТА ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІС ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ТРАНСПОРТНО- НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ

2.1. Джерела даних для забезпечення функціонування ГІС при вирішенні транспортно-навігаційних задач

Ефективність та функціональність будь-якої геоінформаційної системи, особливо призначеної для вирішення динамічних транспортно-навігаційних задач, безпосередньо залежить від якості, повноти, актуальності та доступності вхідних даних. Інформаційне забезпечення таких ГІС є багатокомпонентним і формується з різноманітних джерел. У ГІС дані прийнято поділяти на просторові (координатні), що описують форму та положення об'єктів, та атрибутивні (тематичні), що характеризують їх властивості [31].

Для транспортно-навігаційних ГІС ключовими є такі **типи даних**:

1. Базові картографічні дані: Слугують просторовою основою для візуалізації та аналізу. До них належать:

- Цифрові моделі рельєфу (ЦМР) або висот (ЦМВ) для врахування впливу рельєфу на рух.
- Космічні або аерофотознімки як підкладка для візуального контролю та дешифрування.
- Адміністративно-територіальний устрій (межі областей, районів, населених пунктів).
- Гідрографія та інші загальногеографічні об'єкти.

2. Дані транспортної мережі: Це ядро системи для задач маршрутизації та аналізу доступності. Включають:

- Геометрію дорожнього графу (осьові лінії доріг, вулиць).
- Топологію мережі (інформація про з'єднання ребер у вузлах-перехрестях).

- Атрибути ребер: клас дороги, обмеження швидкості, напрямок руху, кількість смуг, тип покриття, заборони (повороти, проїзд певного транспорту), платні ділянки, середній час проїзду тощо.

- Атрибути вузлів: наявність світлофорів, типи перехресть.

3. Точки інтересу (Points of Interest – POI): Об'єкти інфраструктури та адреси, важливі для навігації та логістики:

- Адреси будівель.
- Зупинки громадського транспорту, вокзали, аеропорти.
- АЗС, СТО, паркінги.
- Склади, логістичні центри, пункти видачі/прийому вантажів.
- Об'єкти соціальної інфраструктури (лікарні, школи тощо).
- Туристичні атракції, заклади харчування та ін.

4. Дані реального часу: Інформація, що динамічно змінюється і є критичною для оперативних задач:

- **Дані про дорожній рух (трафік):** Швидкість потоку, рівень заторів, інформація про ДТП, перекриття руху, дорожні роботи.

- **Дані моніторингу транспортних засобів:** Поточне місцезнаходження (GPS/ГЛОНАСС координати), швидкість, напрямок руху, стан датчиків (для комерційних систем).

- **Розклади та фактичний рух громадського транспорту.**

- **Метеорологічні умови,** що впливають на безпеку руху.

5. Тематичні дані: Додаткова інформація для спеціалізованих задач:

- Соціально-економічні дані (щільність населення, місця роботи/проживання для моделювання попиту).

- Дані про вантажо- та пасажиропотоки.

- Дані про транспортні засоби (тип, вантажопідйомність, екологічний клас).

- Екологічні дані (зони обмеження викидів, рівні шуму).

Суб'єктами джерел цих даних (джерелами даних) можуть виступати:

- **Державні органи та установи:**

- **Національна інфраструктура геопросторових даних (НІГД) України:** Через національний геопортал надається доступ до базових наборів геопросторових даних (адміністративний устрій, гідрографія, базові топографічні дані), хоча наповнення та деталізація транспортних даних може бути на етапі розвитку [5].
 - **Держгеокадастр:** Джерело даних про земельні ділянки та частково топографічної інформації [28].
 - **Укравтодор та Служби автомобільних доріг:** Потенційне джерело даних про мережу доріг державного значення, їх стан та характеристики (доступність даних може бути обмеженою).
 - **Органи місцевого самоврядування:** Можуть вести власні ГІС та надавати дані про комунальні дороги, міську інфраструктуру, маршрути громадського транспорту через міські геопортали.
 - **Державна служба статистики:** Джерело соціально-економічних показників.
- **Комерційні постачальники даних:**
 - Глобальні компанії, такі як **HERE Technologies, TomTom** [30], **Google Maps Platform**, надають детальні, атрибутовані та регулярно оновлювані дані дорожньої мережі, POI, геокодингу, маршрутизації та інформації про трафік у реальному часі для багатьох країн світу, включаючи Україну. Їхні дані часто використовуються у комерційних навігаційних та логістичних системах.
- **Відкриті дані та краудсорсинг:**
 - **OpenStreetMap (OSM):** Глобальний волонтерський проект, що є потужним джерелом безкоштовних геопросторових даних, включаючи досить детальну дорожню мережу та POI для України [29]. Дані доступні за ліцензією ODbL, що дозволяє вільне використання за умови зазначення джерела [29]. Якість та повнота даних OSM можуть варіювати і потребують валідації для критичних застосувань.

– **Відкриті державні дані:** Портали data.gov.ua та міські портали відкритих даних можуть містити набори даних, корисні для транспорту (розклади, перелік маршрутів, дислокація зупинок тощо).

– **Краудсорсингові платформи реального часу:** Сервіси типу Waze збирають інформацію про трафік, ДТП, перешкоди безпосередньо від користувачів.

- **Дані моніторингу та сенсорів (IoT):**

– **GPS/ГЛОНАСС трекери:** Встановлені на транспортних засобах (комерційний транспорт, громадський транспорт, приватні авто з навігаторами/смартфонами).

– **Floating Car Data (FCD):** Дані про швидкість та місцезнаходження, що збираються з великої кількості рухомих транспортних засобів (часто анонімізовані дані від мобільних операторів або навігаційних додатків) [30].

– **Стаціонарні датчики:** Індукційні петлі, камери, радари для вимірювання інтенсивності та швидкості потоку.

- **Дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ):**

– Космічні знімки різної роздільної здатності для створення та оновлення базових карт, моніторингу стану територій.

– Аерофотозйомка та дані LiDAR для створення високоточних моделей рельєфу та 3D-моделей місцевості/інфраструктури.

- **Польові обстеження:** Безпосередній збір даних на місцевості за допомогою GPS-приймачів, мобільних картографічних комплексів для уточнення характеристик доріг, інвентаризації об'єктів інфраструктури.

Важливою характеристикою інформаційного забезпечення є **якість даних**, що включає точність (позиційну та атрибутивну), повноту, логічну узгодженість, актуальність (своєчасність оновлення). Для ефективного функціонування транспортно-навігаційних ГІС часто необхідно комбінувати дані з різних джерел, що потребує механізмів їх інтеграції та гармонізації.

2.2. Систематизація інформаційного забезпечення функціонування ГІС для вирішення транспортно-навігаційних задач

Різноманіття типів та джерел даних, необхідних для функціонування транспортно-навігаційних ГІС, потребує їх ретельної систематизації та організації. Ефективне управління інформаційним забезпеченням є ключовим для забезпечення точності аналізу, надійності навігації та оперативності прийняття рішень. Систематизація охоплює вибір адекватних структур зберігання даних, моделей даних, створення метаданих, а також впровадження процесів інтеграції, контролю якості та оновлення інформації.

Структури зберігання даних: Для комплексних транспортних ГІС, що працюють з великими обсягами різноманітних даних та потребують забезпечення цілісності й підтримки складних зв'язків, найбільш доцільним є використання **баз геоданих (геобаз даних)**. Це спеціалізовані бази даних (наприклад, реалізовані в СУБД PostgreSQL з розширенням PostGIS, Oracle Spatial або у вигляді файлових/серверних геобаз даних Esri), що дозволяють централізовано зберігати як просторові (векторні, растрові), так і атрибутивні дані. Перевагами геобаз даних є можливість визначення правил топології (важливо для мережевого аналізу), доменів атрибутів, класів відношень між об'єктами, що допомагає підтримувати логічну узгодженість даних. Простіші файлові формати (shapefiles, GeoJSON тощо) можуть використовуватися для обміну даними або невеликих проєктів, але менш придатні для управління складними транспортними системами.

Моделі даних: Вибір моделі даних визначає, як об'єкти реального світу та їх взаємозв'язки представляються у цифровому вигляді.

- **Векторна модель** є основною для представлення дискретних об'єктів транспортної інфраструктури: дороги, вулиці, залізниці моделюються як лінійні об'єкти; перехрестя, зупинки, POI – як точкові; зони обслуговування, адміністративні одиниці – як полігональні [31].

- **Растрова модель** використовується для представлення неперервних поверхонь, таких як рельєф (ЦМР), або як фонові зображення (космознімки).

- Критично важливою для транспортних ГІС є **мережева модель даних (Network Data Model)**. Вона будується на основі векторних ліній (ребер) та точок (вузлів), але доповнюється інформацією про **топологію** – правила з'єднання ребер у вузлах, що є необхідним для алгоритмів маршрутизації. Мережева модель, що базується на теорії графів [34], включає атрибути ребер (довжина, швидкість, час проїзду, обмеження) та вузлів (затримки на поворотах, обмеження поворотів), які визначають "вартість" пересування по мережі. Існують спеціалізовані моделі, наприклад, модель даних для громадського транспорту в ArcGIS Network Analyst, що включає окремі класи об'єктів для зупинок, варіантів ліній, елементів маршрутів та таблиці з розкладами [33].

- Для позиціонування об'єктів та подій вздовж лінійних об'єктів (наприклад, кілометрові позначки ДТП на дорозі) використовується **система лінійних координат (Linear Referencing System - LRS)**.

- Як зазначалося раніше [1], для опису складних об'єктів можуть застосовуватися і **об'єктно-орієнтовані моделі**.

- Для роботи з даними реального часу необхідні моделі, що враховують **часовий вимір**, дозволяючи зберігати та аналізувати часові ряди даних (наприклад, зміна швидкості потоку на ділянці дороги).

Метадані: Це "дані про дані", що містять ключову інформацію про набори геопросторових даних та сервіси: джерело, дату створення та оновлення, систему координат, масштаб, точність, повноту, контактну інформацію відповідальної особи, умови використання тощо [27, 6]. Створення та підтримка якісних метаданих є обов'язковим для забезпечення можливості пошуку, оцінки придатності та коректного використання даних, особливо в контексті НІГД. В Україні, як і в ЄС, орієнтиром є міжнародний стандарт **ISO 19115** "Географічна інформація – Метадані" та його профілі [35].

Інтеграція даних та інтероперабельність: Оскільки дані надходять з різних джерел, важливими є процеси їх інтеграції (ETL - Extract, Transform, Load), приведення до єдиної системи координат та формату. Забезпечення інтероперабельності – здатності різних систем обмінюватися даними та взаємодіяти – досягається шляхом використання стандартизованих форматів даних та сервісів доступу (наприклад, OGC WMS, WFS, WMTS [27]).

Управління якістю даних: Якість даних є критичною для надійності результатів ГІС-аналізу та навігації. Процеси управління якістю включають визначення вимог до точності, повноти, актуальності, логічної узгодженості; впровадження автоматизованих (наприклад, перевірка топології в геобазі даних) та ручних процедур контролю; механізми збору зворотного зв'язку від користувачів про помилки в даних.

Процеси оновлення даних: Транспортна інфраструктура та умови руху постійно змінюються, тому необхідні чітко регламентовані процедури оновлення даних. Це стосується як статичних даних (зміни в мережі доріг, нові POI), так і динамічних (дані трафіку, місцезнаходження ТЗ). Сучасні ГІС, особливо серверні та хмарні, підтримують механізми версіонування даних для управління процесом редагування та оновлення.

Отже, систематизація інформаційного забезпечення транспортно-навігаційних ГІС передбачає комплексний підхід до організації даних у геобазах даних з використанням адекватних моделей (особливо мережевих), створення детальних метаданих, забезпечення якості та своєчасного оновлення інформації, що є запорукою надійної та ефективної роботи системи.

2.3. Обґрунтування функціоналу транспортно-навігаційних ГІС

Виходячи з розглянутого комплексу транспортно-навігаційних задач, методологічних підходів до їх вирішення та вимог до інформаційного забезпечення, можна обґрунтувати необхідний набір функцій, якими повинна володіти сучасна транспортно-навігаційна ГІС, особливо якщо вона реалізована

на базі веб-технологій. Цей функціонал має забезпечувати ефективне управління даними, виконання аналітичних операцій, візуалізацію результатів та інтеграцію з іншими системами.

Основні функціональні блоки та вимоги до них:

1. Функції управління даними та візуалізації: Забезпечення роботи з різноманітними даними, що є основою системи.

– **Імпорт та експорт даних:** Підтримка роботи з різними форматами геопросторових даних (векторні: Shapefile, GeoJSON, KML, файлові та серверні геобазы даних; растрові: GeoTIFF, JPG/PNG з прив'язкою; табличні: CSV, Excel) для завантаження даних з різних джерел та обміну результатами.

– **Редагування просторових та атрибутивних даних:** Інструменти для створення, оновлення та виправлення даних транспортної мережі, POI, зон обслуговування тощо, забезпечуючи актуальність інформації.

– **Управління базою геоданих:** Можливості для створення структури бази даних, визначення правил валідації (топологія, домени атрибутів), управління версіями даних.

– **Візуалізація карт:** Якісне та швидке відображення багатошарових карт, включаючи базові карти (знімки, OSM, топооснови), тематичні шари (дорожній граф з атрибутами, POI), результати аналізу (маршрути, зони) та дані реального часу (положення ТЗ, трафік).

– **Управління шарами:** Інструменти для налаштування видимості, порядку відображення, символіки та підписів шарів для ефективного представлення інформації.

– **Геокодування та зворотне геокодування:** Функції перетворення адрес на координати і навпаки, необхідні для визначення місцезнаходження об'єктів та пунктів маршруту.

2. Функції маршрутизації та навігації: Ядро для вирішення задач переміщення.

– **Розрахунок оптимальних маршрутів:** Пошук найкоротшого/найшвидшого шляху між заданими точками з урахуванням

вартості пересування по ребрах мережі (час, відстань), обмежень руху (напрямок, тип транспорту, габарити), а також динамічних факторів (трафік у реальному часі).

– **Генерація покрокових інструкцій (Turn-by-Turn Directions):**

Створення текстового та/або голосового опису маршруту для навігації.

– **Маршрутизація для кількох пунктів (TSP/VRP):**

Функції оптимізації послідовності відвідування множини точок та побудови оптимальних маршрутів для одного чи кількох транспортних засобів.

– **Врахування розкладів (для громадського транспорту):**

Можливість розрахунку маршрутів з урахуванням розкладів руху громадського транспорту [32].

3. Функції моніторингу та роботи з даними реального часу:

Забезпечення оперативного контролю та управління.

– **Відображення рухомих об'єктів:**

Візуалізація на карті поточного місцезнаходження транспортних засобів на основі даних GPS/ГЛОНАСС.

– **Геозонування (Geofencing):**

Створення віртуальних зон на карті та відстеження подій входу/виходу об'єктів із цих зон.

– **Обробка та відображення потокових даних:**

Здатність системи приймати, обробляти та візуалізувати дані реального часу про трафік, стан транспортних засобів, погодні умови тощо [16].

– **Система сповіщень (Alerting):**

Можливість налаштування та генерації сповіщень при виникненні певних подій (перевищення швидкості, відхилення від маршруту, прибуття в пункт призначення, вхід/вихід із геозони).

4. Функції просторового аналізу та оптимізації:

Інструменти для глибокого аналізу та підтримки прийняття рішень.

– **Аналіз зон обслуговування:**

Розрахунок та візуалізація зон доступності від об'єктів по транспортній мережі за часом або відстанню.

– **Пошук найближчих об'єктів:**

Визначення та ранжування найближчих POI до заданої точки.

- **Аналіз розміщення-розподілу:** Інструменти для вибору оптимальних місць розташування нових об'єктів та розподілу попиту.
- **Розрахунок матриць відстаней/часу:** Побудова таблиць вартості переміщень між множиною пунктів.
- **Просторові запити та вибірки:** Можливість вибору об'єктів на карті за їх просторовим розташуванням (у полігоні, буферній зоні) або атрибутивними значеннями.
- **Тематичне картографування та аналіз щільності:** Інструменти для візуалізації просторових закономірностей (наприклад, концентрації ДТП, щільності замовлень).

5. Функції звітності та інтеграції: Забезпечення взаємодії з користувачами та іншими системами.

- **Генерація звітів:** Створення звітів про маршрути, пробіг, час у дорозі, відвідування точок, події моніторингу тощо.
- **Програмні інтерфейси (API/SDK):** Надання можливостей для розробників інтегрувати функції ГІС в інші системи (ERP, CRM, системи управління складом) або створювати власні спеціалізовані додатки. Це особливо важливо для веб-ГІС платформ.
- **Підтримка веб-сервісів:** Можливість як використовувати зовнішні веб-сервіси (картографічні підкладки, геокодування, трафік), так і публікувати власні дані та аналітичні функції у вигляді стандартних веб-сервісів (WMS, WFS, WPS, сервіси маршрутизації) [27].
- **Управління користувачами та правами доступу:** Механізми для розмежування доступу до даних та функціоналу системи для різних груп користувачів.

Обґрунтований набір функцій показує, що транспортно-навігаційна ГІС має поєднувати стандартні можливості роботи з геоданими, потужні інструменти мережевого аналізу, засоби обробки даних реального часу та гнучкі механізми інтеграції. Реалізація цього функціоналу, особливо в рамках

веб-ГІС, формує основу для порівняння існуючих програмних рішень, яке буде проведено в наступному підрозділі.

2.4. Огляд та порівняння функціоналу програмного забезпечення, придатного для побудови транспортно-навігаційної ГІС

Вибір програмного забезпечення (ПЗ) є ключовим етапом при створенні транспортно-навігаційної ГІС, оскільки саме ПЗ визначає доступний функціонал, можливості аналізу, масштабованість системи та зручність її використання. Ринок пропонує широкий спектр рішень, від комплексних комерційних платформ до гнучких наборів програм з відкритим кодом (Open Source Software - OSS). Оцінку ПЗ доцільно проводити на основі функціональних вимог, обґрунтованих у підрозділі 2.3, з особливим акцентом на можливості реалізації веб-ГІС.

Комерційне програмне забезпечення:

1. Платформа Esri ArcGIS (ArcGIS Pro, ArcGIS Enterprise, ArcGIS Online):

– **Опис:** Лідер ринку ГІС, що пропонує комплексну платформу. **ArcGIS Pro** – потужна настільна ГІС для підготовки даних, складного аналізу та картографування. **ArcGIS Enterprise** дозволяє розгорнути повнофункціональну ГІС-інфраструктуру на власних серверах (включаючи веб-сервіси, портал, бази геоданих). **ArcGIS Online** – хмарна SaaS-платформа (Software as a Service), що надає готові інструменти для створення веб-карт, додатків, аналізу даних та спільної роботи через веб-браузер [22].

– **Функціонал для транспорту:** Має потужний модуль **Network Analyst** (доступний у Pro, Enterprise, Online) для вирішення всіх основних задач мережевого аналізу: розрахунок маршрутів (з урахуванням трафіку, обмежень), зон обслуговування, пошуку найближчих об'єктів, VRP, розміщення-розподілу [32]. Підтримує роботу з даними реального часу (через GeoEvent Server в Enterprise або Velocity в Online). Надає широкі можливості для створення

інтерактивних веб-карт, мобільних додатків (Field Maps, Survey123) та інформаційних панелей (Dashboards). Має розвинені API та SDK для інтеграції та розробки.

– **Переваги:** Комплексність, потужний аналітичний інструментарій (особливо Network Analyst), зрілі веб-ГІС технології, хороша документація та підтримка.

– **Недоліки:** Висока вартість ліцензій та кредитів (для деяких операцій в ArcGIS Online).

2. Google Maps Platform:

– **Опис:** Набір хмарних API та SDK від Google, що дозволяє інтегрувати карти, маршрутизацію, геокодування, пошук POI та дані про трафік у власні веб- та мобільні додатки.

– **Функціонал для транспорту:** Дуже сильні сторони – якісні базові карти, глобальне покриття даних, точне геокодування, потужні API маршрутизації (включаючи дані про трафік у реальному часі та прогнозування), пошук місць.

– **Переваги:** Висока продуктивність, глобальні дані, знайомий користувацький досвід, гнучка модель оплати за використання API (з безкоштовним лімітом).

– **Недоліки:** Менший фокус на традиційному ГІС-аналізі (складні просторові запити, аналіз зон, VRP/Location-Allocation потребують значної власної розробки або використання сторонніх інструментів), обмежені можливості управління власними геоданими безпосередньо на платформі. Більше підходить для інтеграції картографічних функцій у додатки, ніж як самостійна ГІС-платформа.

3. Mapbox:

○ **Опис:** Гнучка хмарна платформа, що надає API та SDK для створення кастомізованих інтерактивних карт, візуалізації даних, навігації та пошуку.

- **Функціонал для транспорту:** Надає API для маршрутизації (автомобільної, велосипедної, пішохідної), розрахунку матриць відстаней, геокодування, оптимізації маршрутів (VRP), відображення трафіку. Особливий акцент на високій якості картографічного дизайну та можливостях кастомізації візуалізації [23].

- **Переваги:** Гнучкість налаштування карт та візуалізації, потужні інструменти для розробників веб- та мобільних додатків, конкурентна модель ціноутворення за використання API.

- **Недоліки:** Як і Google Maps, менше орієнтована на комплексний ГІС-аналіз порівняно з ArcGIS.

4. HERE Technologies:

- **Опис:** Платформа, що історично сфокусована на автомобільній навігації та логістиці [29]. Надає високоякісні карти, дані про трафік, API для маршрутизації, геокодування, пошуку POI, а також спеціалізовані рішення для логістики та HD-карти для автономних транспортних засобів.

- **Функціонал для транспорту:** Сильні сторони – якість та детальність даних дорожньої мережі (особливо атрибути для вантажного транспорту), точна маршрутизація з урахуванням специфіки ТЗ, потужні API для логістичних задач.

- **Переваги:** Глибока експертиза в автомобільній сфері, якісні дані, рішення для HD-карт.

- **Недоліки:** Може бути менш гнучкою для загальних ГІС-задач порівняно з ArcGIS.

Програмне забезпечення з відкритим кодом (Open Source Software - OSS):

На відміну від комерційних платформ "все в одному", OSS-рішення для веб-ГІС часто будуються як стек (набір) взаємодіючих компонентів:

- **Настільна ГІС: QGIS** – найпопулярніша вільна настільна ГІС з широким функціоналом для створення, редагування, аналізу даних та картографування. Має велику кількість плагінів, зокрема для мережевого

аналізу (хоча можливості можуть поступатися ArcGIS Network Analyst). Використовується для підготовки даних.

- **База геоданих: PostgreSQL з розширенням PostGIS** – де-факто стандарт для зберігання геоданих у світі OSS. Надає потужні можливості для просторових запитів та аналізу безпосередньо в базі даних.
- **Сервер веб-картографії: GeoServer або MapServer** – використовуються для публікації геоданих у вигляді стандартних веб-сервісів (WMS, WFS, WCS, WMTS), до яких можуть звертатися веб-клієнти.
- **Веб-клієнти: JavaScript бібліотеки OpenLayers або Leaflet** – використовуються для створення інтерактивних карт у веб-браузері, відображення шарів з GeoServer/MapServer та взаємодії з користувачем.
- **Сервер маршрутизації: OSRM (Open Source Routing Machine), GraphHopper, Valhalla** – самостійні рушії маршрутизації, які зазвичай працюють з даними OpenStreetMap [18]. Вони можуть бути розгорнуті на власному сервері та надавати API для розрахунку маршрутів, матриць відстаней.
- **Переваги OSS-стеку:**
 - **Безкоштовність ліцензій:** Відсутність плати за саме ПЗ.
 - **Гнучкість та кастомізація:** Можливість вибирати та комбінувати компоненти, модифікувати код.
 - **Відкриті стандарти:** Дотримання стандартів OGC забезпечує інтероперабельність.
 - **Активна спільнота:** Підтримка з боку спільноти розробників та користувачів.
- **Недоліки OSS-стеку:**
 - **Складність налаштування та інтеграції:** Потребує вищої технічної кваліфікації для розгортання та адміністрування стеку компонентів.
 - **Обмежений функціонал "з коробки":** Деякі складні аналітичні функції (наприклад, VRP, Location-Allocation) можуть потребувати додаткових плагінів або власної розробки.

– **Підтримка:** Відсутність єдиного постачальника для комплексної технічної підтримки (хоча доступна комерційна підтримка для окремих компонентів).

– **Залежність від даних:** Якість результатів (особливо маршрутизації) сильно залежить від якості та повноти даних, що використовуються (часто OSM).

Зроблено узагальнений порівняльний аналіз програмного забезпечення, який представлений у табл. 2.1. Це дозволило обрати ArcGIS Online як платформу для практичної частини дослідження.

Таблиця 2.1.

Узагальнений порівняльний аналіз програмного забезпечення

Функція / Платформа	ArcGIS Online/Enterprise	Google Maps Platform	Mapbox	HERE Technologies	OSS стек (типовий)
Комплексний ГІС-аналіз	+++	+	+	++	++ (з QGIS/PostGIS)
Мережевий аналіз (Базовий)	+++	+++ (API)	+++ (API)	+++ (API)	++ (з OSRM/GH)
VRP/Location-Allocation	+++	- (потрібна розробка)	++ (API)	++ (API)	+/- (потрібні інструменти)
Робота з Real-time	++ (спец. компоненти)	++ (API трафіку)	++ (API трафіку)	++ (API трафіку)	+/- (потрібна розробка)
Якість базових даних	++ (різні джерела)	+++	++ (OSM+власні)	+++	+ (залежить від OSM)
Веб-ГІС "з коробки"	+++ (Online/Portal)	- (тільки API)	- (тільки API)	- (тільки API)	- (потрібен стек)
API/SDK для розробки	+++	+++	+++	+++	++ (різні компоненти)
Гнучкість кастомізації	++	+++ (через API)	+++	++ (через API)	+++
Вартість ліцензій/API	Висока	За використання	За використання	За використання	Відсутня (ПЗ)
Простота впровадження	++ (SaaS/PaaS)	+++ (API)	+++ (API)	+++ (API)	+ (потребує експертизи)

(Оцінки: +++ Висока, ++ Середня, + Низька/Обмежена, +/- Залежить від компонентів/розробки, - Відсутня)

Таким чином вибір програмного забезпечення для транспортно-навігаційної ГІС залежить від конкретних задач, масштабу проекту, бюджету, наявної ІТ-інфраструктури та технічної експертизи команди.

- **Комерційні API-платформи (Google, Mapbox, HERE)** добре підходять для інтеграції картографічних та базових навігаційних функцій у власні веб- та мобільні додатки, особливо коли потрібні глобальні дані та висока продуктивність "з коробки".
- **Стек ПЗ з відкритим кодом** надає максимальну гнучкість та економію на ліцензіях, але потребує значних зусиль на налаштування, інтеграцію та підтримку, а якість результатів (особливо маршрутизації) залежить від якості вхідних даних (часто OSM).
- **Платформа Esri ArcGIS**, зокрема її веб-компоненти **ArcGIS Online** та **ArcGIS Enterprise**, пропонує найбільш збалансований та комплексний набір інструментів "з коробки" для вирішення широкого спектра транспортно-навігаційних задач – від управління даними та візуалізації до складного мережевого аналізу (включаючи VRP, Location-Allocation) та роботи з даними реального часу. Враховуючи це, а також явну вказівку у плані бакалаврської роботи на використання ArcGIS Online для практичної реалізації (Розділ 3), саме ця платформа буде детальніше розглянута як інструмент для вирішення поставлених задач.

2.5. Характеристика необхідного технічного забезпечення для реалізації задач транспортної навігації

Ефективна реалізація функціоналу транспортно-навігаційної ГІС, особливо при використанні веб-технологій та обробці даних реального часу, потребує відповідного технічного (апаратного) забезпечення та мережевої інфраструктури. Конкретні вимоги залежать від обраної архітектури системи (настільна, клієнт-серверна, веб-орієнтована, хмарна), масштабу задач, обсягу даних та кількості користувачів.

Основні компоненти технічного забезпечення:

1. Серверна інфраструктура: Є основою для централізованих та веб-орієнтованих ГІС. Вимоги суттєво залежать від того, чи розгортається система

на власних ресурсах (On-Premise) чи використовуються хмарні сервіси (IaaS, PaaS, SaaS).

– **Сервер застосунків/Веб-сервер:** Необхідний для розміщення серверних компонентів ГІС (наприклад, ArcGIS Server, GeoServer), веб-додатків, порталу ГІС. Вимагає достатньої обчислювальної потужності (CPU), обсягу оперативної пам'яті (RAM) та швидкого дискового простору для обробки запитів користувачів та генерації карт/відповідей. Для веб-ГІС важлива висока доступність та масштабованість (можливість додавання ресурсів при зростанні навантаження).

– **Сервер баз даних:** Призначений для зберігання та управління геобазою даних (PostgreSQL/PostGIS, SQL Server тощо). Вимагає значних дискових ресурсів (часто швидкісних SSD), великого обсягу RAM для кешування запитів, потужного CPU та надійної системи резервного копіювання.

– **Сервер(и) обробки та аналізу:** Можуть знадобитися для виконання ресурсомістких аналітичних задач (складна маршрутизація VRP, просторове моделювання, аналіз великих даних, запуск моделей AI/ML). Це можуть бути високопродуктивні сервери, можливо, з графічними процесорами (GPU) для прискорення обчислень.

– **Сервер обробки даних реального часу:** Для систем, що працюють з поточними даними від GPS-трекерів чи сенсорів (наприклад, з використанням ArcGIS GeoEvent Server), потрібні сервери з високою пропускну здатністю та низькою затримкою для прийому та обробки великої кількості повідомлень.

– **Хмарна інфраструктура (IaaS/PaaS):** Провайдери, такі як Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure, Google Cloud Platform, пропонують віртуальні сервери, бази даних, сховища та спеціалізовані сервіси, що дозволяють гнучко масштабувати ресурси та часто знизити початкові витрати на обладнання порівняно з On-Premise розгортанням.

– **SaaS-платформи (напр., ArcGIS Online):** У цьому випадку значна частина серверної інфраструктури управляється провайдером послуги, а

користувач отримує доступ до функціоналу через веб-інтерфейс, що суттєво спрощує вимоги до власної інфраструктури клієнта.

2. Клієнтські пристрої: Пристрої, з яких користувачі взаємодіють із системою.

– **Настільні ПК та робочі станції:** Використовуються ГІС-аналітиками, адміністраторами, диспетчерами для роботи з настільними ГІС (ArcGIS Pro, QGIS), доступу до веб-порталу, виконання складного аналізу, підготовки даних. Вимагають достатньо потужних процесорів, значного обсягу RAM та продуктивних відеокарт.

– **Ноутбуки:** Забезпечують мобільність для аналітиків та менеджерів при збереженні високої продуктивності.

– **Планшети та смартфони:** Основні пристрої для доступу до мобільних версій веб-ГІС, навігаційних додатків, інструментів збору даних у полі (наприклад, інспектори стану доріг, кур'єри). Повинні мати вбудовані GPS/GNSS приймачі, доступ до мобільного інтернету, достатній розмір та роздільну здатність екрану. Для польових робіт можуть знадобитися захищені (ruggedized) моделі.

3. Обладнання для навігації та моніторингу: Пристрої для збору первинних даних про місцезнаходження та стан об'єктів.

– **GPS/GNSS приймачі:** Інтегровані в мобільні пристрої, автомобільні навігатори або як окремі професійні прилади для польових вимірювань з різним рівнем точності.

– **Автомобільні трекери:** Спеціалізовані пристрої, що встановлюються на транспортні засоби, передають дані про координати, швидкість, пробіг, часто додаткові параметри (з CAN-шини, датчиків температури тощо) через мережі мобільного зв'язку.

– **Різноманітні сенсори:** Датчики інтенсивності руху, камери відеоспостереження, метеостанції, датчики паркування – джерела даних реального часу про стан транспортної системи та навколишнього середовища.

4. Мережева інфраструктура: Забезпечує зв'язок між усіма компонентами системи.

– **Підключення до Інтернету:** Стабільне та швидкісне підключення є критично важливим для веб-ГІС, доступу до хмарних сервісів, отримання та передачі даних реального часу.

– **Локальна обчислювальна мережа (LAN):** Необхідна для роботи в межах офісу, з'єднання клієнтських ПК із серверами (при On-Premise архітектурі).

– **Мережі мобільного зв'язку (3G/4G/5G):** Забезпечують передачу даних від мобільних пристроїв та трекерів. Розвиток мереж 5G з низькими затримками відкриває нові можливості для V2X комунікацій та більш складних сценаріїв реального часу.

– **Засоби мережевої безпеки:** Брандмауери (Firewalls), VPN, системи виявлення вторгнень необхідні для захисту даних та інфраструктури від несанкціонованого доступу.

Таким чином, технічне забезпечення транспортно-навігаційних ГІС є комплексною системою, що включає серверні ресурси (з можливістю вибору між власною інфраструктурою та хмарними сервісами), різноманітні клієнтські пристрої для різних категорій користувачів, спеціалізоване обладнання для збору даних та надійну мережеву інфраструктуру для їх передачі. Масштабованість, надійність та безпека є ключовими вимогами до технічного забезпечення сучасних транспортних ГІС.

РОЗДІЛ 3.

МЕТОДИКА ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГІС ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ТРАНСПОРТНО-НАВІГАЦІЙНИХ ЗАДАЧ

3.1. Функціонал ArcGis Online, як програмного забезпечення для вирішення транспортно-навігаційних задач

Як було обґрунтовано в підрозділі 2.4, платформа Esri ArcGIS, зокрема її хмарний SaaS-компонент ArcGIS Online, надає комплексний набір інструментів, що відповідає функціональним вимогам до сучасних транспортно-навігаційних веб-ГІС. ArcGIS Online дозволяє користувачам створювати інтерактивні карти, аналізувати геопросторові дані, ділитися результатами та співпрацювати над проектами через веб-браузер, не потребуючи розгортання власної складної серверної інфраструктури [16]. Розглянемо ключові функціональні можливості ArcGIS Online, релевантні для вирішення транспортно-навігаційних задач.

1. Створення веб-карт та візуалізація: ArcGIS Online надає інтуїтивно зрозумілий інтерфейс Map Viewer для створення багатошарових інтерактивних веб-карт. Користувачі можуть комбінувати різноманітні базові карти (надані Esri, супутникові знімки, топографічні карти, OpenStreetMap), власні дані, завантажені на платформу, та дані з інших джерел (наприклад, сервіси НІГД). Платформа підтримує гнучке налаштування символіки, підписів, спливаючих вікон (pop-ups) для шарів, а також інтелектуальні засоби картографування (Smart Mapping) для швидкої та ефективної візуалізації даних. Важливою є можливість візуалізації динамічних даних, наприклад, положення транспортних засобів, що оновлюється в реальному часі.

2. Хостинг та управління даними: Платформа дозволяє користувачам завантажувати та зберігати власні геопросторові дані у вигляді різних типів шарів:

- **Hosted Feature Layers:** Основний тип для векторних даних (точки, лінії, полігони), підтримують редагування, просторові запити та аналіз. Дані транспортної мережі, POI, зони доставки зазвичай зберігаються саме так.

- **Hosted Tile Layers:** Оптимізовані для швидкого відображення растрових даних або складних векторних даних як базових карт (кешовані зображення).

- **Hosted Scene Layers:** Для відображення та роботи з 3D-даними. Підтримується імпорт даних з файлів (Shapefile, CSV, KML, файлові геобазис даних). Базові функції редагування доступні безпосередньо у веб-карті. Для складнішої підготовки та управління даними передбачена тісна інтеграція з настільною ГІС **ArcGIS Pro**.

3. Сервіси мережевого аналізу: Це ключовий блок функцій для транспортних задач, доступний в ArcGIS Online як набір готових до використання веб-сервісів (їх використання зазвичай потребує витрати кредитів – внутрішньої валюти платформи) [35]. Ці сервіси використовують високоякісні дані дорожньої мережі від Esri, що охоплюють більшість країн світу та включають інформацію про обмеження та умови руху, а також дані про трафік (історичний, поточний та прогнозований). Основні сервіси:

- **Routing (Маршрутизація):** Знаходження оптимальних маршрутів (driving time/distance, walking, trucking), розглядаючи трафік (історичний, живий, прогнозований), бар'єри, обмеження. Генерує покрокові інструкції.

- **Closest Facility (Пошук найближчого об'єкта):** Визначення найближчих об'єктів (лікарень, пожежних станцій, складів) до заданої точки по транспортній мережі.

- **Service Area (Зона обслуговування):** Побудова зон доступності (ізохрон або ізодистан) від об'єкта по мережі.

- **Location-Allocation (Розміщення-Розподіл):** Інструменти для вибору оптимальних місць розташування об'єктів та призначення їм зон попиту.

– **Vehicle Routing Problem (VRP) (Задача маршрутизації транспорту):** Оптимізація маршрутів для парку транспортних засобів, що обслуговують множину замовлень.

– **Origin-Destination (OD) Cost Matrix (Матриця кореспонденцій):** Розрахунок вартості (часу/відстані) поїздок між багатьма пунктами відправлення та призначення.

4. Інструменти просторового аналізу: Окрім мережевого аналізу, ArcGIS Online надає доступ до широкого набору інструментів геообробки, що виконуються як веб-сервіси (також часто потребують кредитів) [36]: геокодування/зворотне геокодування, побудова буферних зон, аналіз накладання (оверлей), агрегація даних (Summarize Within, Aggregate Points), збагачення даних (GeoEnrichment – додавання демографічної інформації), аналіз щільності та виявлення гарячих точок (Hot Spot Analysis) тощо.

5. Робота з даними реального часу: Базові можливості включають відображення даних з регулярно оновлюваних feature-шарів. Для розширеної роботи з великими обсягами потокових даних від IoT-пристроїв та GPS-трекерів Esri пропонує хмарне розширення **ArcGIS Velocity** [37]. Воно дозволяє налаштовувати прийом даних з різних джерел, виконувати їх обробку та аналіз "на льоту" (фільтрація, перетворення, виявлення подій, геозонування), зберігати результати та візуалізувати їх [37].

6. Створення веб-додатків та інформаційних панелей: ArcGIS Online дозволяє легко створювати та публікувати готові веб-додатки на основі створених карт без необхідності програмування, використовуючи конфігуровані шаблони (Instant Apps, StoryMaps). Особливо корисним для моніторингу транспорту є **ArcGIS Dashboards** [38, 39] – інструмент для створення інтерактивних інформаційних панелей, що відображають ключові показники, статистику та карти (включаючи дані реального часу) в єдиному інтерфейсі. Для більш складних кастомних додатків доступні візуальні конструктори (Experience Builder, Web AppBuilder) та **ArcGIS API for JavaScript/Python**.

7. Мобільні додатки: Платформа тісно інтегрована з мобільними додатками Esri:

– **ArcGIS Field Maps:** Універсальний додаток для перегляду карт, збору та редагування даних у полі, а також відстеження місцезнаходження польових працівників [40].

– **ArcGIS Navigator:** Мобільний навігаційний додаток, що дозволяє використовувати власні карти організації та оптимізовані маршрути (створені, наприклад, за допомогою VRP-сервісу) для навігації водіїв та кур'єрів [41].

– **ArcGIS Survey123:** Додаток для збору даних через інтелектуальні форми.

8. Спільна робота та обмін даними: ArcGIS Online побудована на принципах співпраці, дозволяючи користувачам ділитися картами, шарами даних, додатками та результатами аналізу всередині організації (через групи) або з широкою громадськістю.

Таким чином, ArcGIS Online надає потужний та інтегрований набір хмарних інструментів для вирішення більшості транспортно-навігаційних задач – від підготовки та візуалізації даних до складного мережевого аналізу, роботи з даними реального часу та створення кінцевих веб- і мобільних додатків. Наявність готових сервісів мережевого аналізу та інструментів для швидкого створення додатків робить її привабливим вибором для практичної реалізації завдань даної бакалаврської роботи, хоча й слід враховувати модель оплати за використання аналітичних сервісів (кредити).

3.2. Алгоритм практичної реалізації функціонування ГІС для вирішення транспортно-навігаційних задач

Практична реалізація вирішення транспортно-навігаційних задач засобами веб-ГІС платформи ArcGIS Online, як правило, включає послідовність логічних кроків, що охоплюють підготовку даних, виконання аналізу та

представлення результатів. Цей процес можна представити у вигляді наступного узагальненого алгоритму:

Етап 1: Постановка задачі та визначення вихідних даних.

- **Формулювання задачі:** Чітко визначити транспортну або навігаційну проблему, яку необхідно вирішити (наприклад, знайти найшвидший маршрут доставки, визначити зону пішохідної доступності від станції метро, оптимізувати маршрути для парку транспортних засобів, візуалізувати дані моніторингу).

- **Ідентифікація вхідних даних:** Визначити, які саме просторові та атрибутивні дані необхідні для вирішення поставленої задачі (наприклад, координати або адреси пунктів відправлення/призначення, розташування об'єктів інфраструктури, характеристики транспортних засобів, часові обмеження, параметри для мережевого аналізу).

- **Визначення критеріїв:** Сформулювати критерії оптимізації або аналізу (наприклад, мінімізувати час у дорозі, мінімізувати відстань, максимізувати охоплення території, враховувати поточний трафік).

Етап 2: Підготовка даних в середовищі ArcGIS Online.

- **Збір та завантаження даних:** Зібрати необхідні вхідні дані з джерел, описаних у підрозділі 2.1. Завантажити ці дані в ArcGIS Online, створюючи відповідні шари (найчастіше – **Hosted Feature Layers**). Це можуть бути таблиці з адресами (CSV, Excel), файли з геоданими (Shapefile, KML, файлові геобазис даних), або дані можуть бути створені вручну безпосередньо на карті.

- **Геокодування (за необхідності):** Якщо вхідні дані містять адреси, використати інструменти геокодування ArcGIS Online для їх перетворення на точкові об'єкти на карті. Перевірити точність результатів геокодування.

- **Підготовка веб-карти:** Створити нову веб-карту в **Map Viewer** ArcGIS Online. Додати на карту необхідні базові шари (наприклад, OpenStreetMap, супутниковий знімок, топографічну карту Esri) та завантажені/створені шари з вхідними даними (пункти, об'єкти, зони).

- **Налаштування шарів:** Налаштувати символіку, підписи та спливаючі вікна (pop-ups) для вхідних шарів для зручності візуального сприйняття та аналізу.

Етап 3: Виконання аналізу за допомогою інструментів ArcGIS Online.

- **Вибір інструменту аналізу:** В інтерфейсі Map Viewer перейти до панелі "Аналіз" ("Analysis") та обрати інструмент, що відповідає поставленій задачі (функціонал описано в 3.1):

- *Маршрутизація:* "Знайти маршрути" ("Find Routes"), "Спланувати маршрути" ("Plan Routes" - для VRP).

- *Зони обслуговування:* "Створити зони часу в дорозі" ("Create Drive-Time Areas").

- *Найближчі об'єкти:* "Знайти найближчі" ("Find Nearest").

- *Розміщення-Розподіл:* "Вибрати кращі місця розташування" ("Choose Best Facilities").

- *Матриця кореспонденцій:* "Розрахувати матрицю вартості поїздок" ("Generate OD Cost Matrix").

- *Аналіз патернів:* "Знайти гарячі точки" ("Find Hot Spots"), "Розрахувати щільність" ("Calculate Density") тощо.

- **Налаштування параметрів аналізу:** Заповнити параметри обраного інструменту: вказати вхідні шари (точки маршруту, об'єкти, бар'єри), обрати режим пересування (час/відстань за кермом, для вантажівки, пішки), вказати час відправлення/прибуття, налаштувати використання даних про трафік (якщо потрібно), задати специфічні обмеження (уникнення доріг певного типу, U-поворотів тощо), визначити кількість результатів чи радіус пошуку.

- **Запуск аналізу:** Підтвердити параметри та запустити виконання аналізу. Система виконає розрахунки, використовуючи хмарні сервіси та дані дорожньої мережі Esri. Цей крок зазвичай потребує витрати кредитів ArcGIS Online.

Етап 4: Візуалізація та інтерпретація результатів.

- **Додавання результатів на карту:** Інструмент аналізу створить новий шар (або кілька шарів) з результатами (лінії маршрутів, полігони зон обслуговування, точки розподілу тощо). Цей шар автоматично додається на веб-карту.

- **Налаштування візуалізації результатів:** Змінити символіку та підписи результативного шару для максимальної інформативності та наочності (наприклад, показати напрямок руху на маршруті, різними кольорами позначити різні зони доступності, відобразити ключові атрибути у спливаючих вікнах).

- **Аналіз атрибутів:** Відкрити та проаналізувати атрибутивну таблицю результативного шару, яка містить розраховані значення (загальний час та відстань маршруту, час прибуття, площа зони обслуговування тощо).

- **Інтерпретація:** Оцінити отримані результати в контексті вихідної задачі. Перевірити їх логічність та адекватність. За необхідності – скоригувати параметри аналізу (Етап 3) та виконати його повторно.

Етап 5: Представлення та поширення результатів.

- **Збереження веб-карти:** Зберегти веб-карту з усіма вхідними даними та результатами аналізу.

- **Створення веб-додатку/інформаційної панелі:** Використовуючи збережену веб-карту як основу, створити кінцевий продукт для користувачів за допомогою конфігурованих шаблонів додатків (**Instant Apps**), конструкторів (**Experience Builder, Web AppBuilder**) або **ArcGIS Dashboards**. Це дозволяє представити результати у зручному інтерактивному вигляді, адаптованому до конкретної аудиторії (диспетчери, менеджери, водії, громадськість).

- **Налаштування спільного доступу (Sharing):** Надати доступ до створеної карти, додатку або інформаційної панелі відповідним користувачам або групам в організації ArcGIS Online, або зробити їх загальнодоступними.

- **Експорт результатів (за необхідності):** Експортувати результативні шари в різні формати для подальшого використання в інших системах або для підготовки звітних матеріалів. Сформувані звіти або друковані карти.

Цей узагальнений алгоритм демонструє типову послідовність дій при використанні ArcGIS Online для вирішення транспортно-навігаційних задач. Важливо зазначити, що конкретні інструменти та налаштування на Етапі 3 будуть варіюватися залежно від специфіки задачі, але загальна логіка робочого процесу – від постановки задачі та підготовки даних до аналізу, візуалізації та поширення результатів – залишається незмінною. Цей алгоритм слугуватиме основою для розгляду конкретних прикладів у наступному підрозділі.

3.3. Приклади транспортно-навігаційних задач засобами ГІС

Наведені нижче приклади ілюструють застосування загального алгоритму (описаного в 3.2) та функціоналу платформи ArcGIS Online (описаного в 3.1) для вирішення різноманітних транспортно-навігаційних задач.

Приклад 1: Оптимальний маршрут з кількома зупинками та часовим обмеженням.

- **Контекст задачі:** Цей сценарій є типовим для служб доставки, виїзних сервісних інженерів або торгових представників. Необхідно спланувати денний маршрут, що починається з бази (A), включає відвідування кількох клієнтів (B, C, D) з певним часом на обслуговування в кожній точці, і закінчується в кінцевому пункті (E), при цьому весь маршрут має вкластися у визначений часовий бюджет (наприклад, робочий день мінус обідня перерва).

- **Рішення в AGOL:** Використовується інструмент "Спланувати маршрути" ("Plan Routes"). Він дозволяє задати початкову та кінцеву точки, список проміжних зупинок з часом обслуговування (з атрибутів вхідного шару), кількість транспортних засобів (у цьому випадку – 1) та максимальну тривалість маршруту. Важливо задати час відправлення та увімкнути використання даних про трафік для реалістичного розрахунку часу в дорозі. Інструмент може також оптимізувати послідовність відвідування зупинок B, C, D, якщо вона не задана жорстко, для мінімізації загального часу [14].

- **Результат та інтерпретація:** Результатом є шар з оптимальним маршрутом та шар із послідовністю зупинок, де в атрибутах вказано розрахунковий час прибуття та відправлення для кожної точки, а також загальний час всього маршруту. Аналіз атрибутів дозволяє перевірити, чи вписується загальний час у заданий бюджет. Якщо ні, або якщо інструмент не зміг включити всі зупинки (створився шар "Непризначені зупинки"), це свідчить про неможливість виконання завдання за даних умов.

Приклад 2: Розрахунок зон обслуговування (доступності).

- **Контекст задачі:** Необхідно оцінити, яку територію може обслужити нова амбулаторія або пожежна частина за певний нормативний час доїзду (наприклад, 10 хвилин), або визначити зону пішохідної доступності (наприклад, 15 хвилин) навколо станції метро для планування розвитку прилеглої території.

- **Рішення в AGOL:** Використовується інструмент "Створити зони часу в дорозі" ("Create Drive-Time Areas"). Він будує полігони навколо вихідних точок (амбулаторія, станція метро), які охоплюють всі ділянки дорожньої мережі (або пішохідних шляхів при відповідному налаштуванні режиму), досяжні за вказаний час (або відстань). Можна задати кілька інтервалів (наприклад, 5, 10, 15 хвилин) і враховувати напрямок руху (до об'єкта чи від нього), а також умови трафіку (як зазначено в описі функціоналу платформи в підрозділі 3.1).

- **Результат та інтерпретація:** Отримані полігони (ізохрони) наочно показують межі зон обслуговування чи доступності, дозволяючи візуально оцінити покриття території, виявити "білі плями" або порівняти доступність різних об'єктів. Це важливо для обґрунтування розміщення нових об'єктів або оптимізації роботи існуючих.

Приклад 3: Пошук найближчих об'єктів.

- **Контекст задачі:** В екстреній ситуації (наприклад, виклик швидкої допомоги) необхідно швидко визначити, яка бригада або лікарня знаходиться

найближче до місця події за реальним часом доїзду по дорогах. Або, наприклад, водію потрібно знайти найближчу АЗС певного бренду вздовж свого маршруту.

- **Рішення в AGOL:** Використовується інструмент "Знайти найближчі" ("Find Nearest"). Він розраховує час або відстань по мережі від одного або кількох вихідних пунктів (місце події, поточне положення водія) до набору потенційних пунктів призначення (лікарні, АЗС, бригади швидкої). Можна задати кількість об'єктів, які потрібно знайти (наприклад, 3 найближчих), та максимальний радіус пошуку (як зазначено в описі функціоналу платформи в підрозділі 3.1).

- **Результат та інтерпретація:** Результатом є таблиця з ранжованим списком найближчих об'єктів та часом/відстанню до них, а також лінії маршрутів на карті, що з'єднують вихідні точки з знайденими об'єктами. Це дозволяє оперативно приймати рішення про диспетчеризацію або вибір оптимального пункту призначення, мінімізуючи час реагування чи відхилення від основного маршруту.

Приклад 4: Оперативний моніторинг рухомих об'єктів.

- **Контекст задачі:** Логістична компанія потребує постійного відстеження місцезнаходження своїх вантажівок, контролю дотримання маршрутів та графіків, оперативного реагування на позаштатні ситуації.

- **Рішення в AGOL:** Дані з GPS-трекерів вантажівок передаються в реальному часі та оновлюють Feature Layer. Для обробки великих потоків даних та складних правил може використовуватись **ArcGIS Velocity** [37]. Для візуалізації створюється **ArcGIS Dashboard** [38, 39], де на карті відображається поточне положення вантажівок (з різними символами залежно від статусу), а також додаються індикатори, списки, діаграми з ключовими метриками (кількість активних машин, відсоток виконання завдань).

- **Результат та інтерпретація:** Інформаційна панель надає диспетчерам та менеджерам цілісне уявлення ("common operational picture") про поточну оперативну обстановку, дозволяючи ефективно управляти автопарком,

ідентифікувати проблеми (затори, відхилення від маршруту) та швидко реагувати.

Приклад 5: Аналіз концентрації подій (на прикладі ДТП).

- **Контекст задачі:** Департамент транспорту або поліція прагне виявити місця концентрації дорожньо-транспортних пригод для впровадження заходів з підвищення безпеки руху.

- **Рішення в AGOL:** Використовуються інструменти просторової статистики, зокрема "Знайти гарячі точки" ("Find Hot Spots"), який реалізує статистику Getis-Ord G_i^* . Цей інструмент аналізує точковий шар з місцями ДТП (що містять координати та, можливо, атрибути тяжкості чи дати) і визначає, чи є просторова концентрація точок у певних місцях статистично значущою порівняно з випадковим розподілом [36].

- **Результат та інтерпретація:** Результатом є карта, де статистично значущі кластери високої концентрації ДТП ("гарячі точки") та низької концентрації ("холодні точки") виділені різними кольорами. Це допомагає об'єктивно визначити пріоритетні ділянки для детального аналізу причин аварійності та вжиття заходів безпеки.

Ці приклади ілюструють, як стандартні інструменти аналізу та візуалізації ArcGIS Online можуть бути застосовані для вирішення широкого кола завдань у сфері транспорту та навігації, перетворюючи сирі геопросторові дані на корисну інформацію для прийняття рішень.

3.4. Практичне дослідження

Результатом практичного дослідження є виконані дві логістичні задачі.

Перша логістична задача –

є прикладом розрахунку маршруту для малої транспортної компанії. В ній побудований круговий маршрут від складу (що є стартом) до магазинів (що є зупинками) з кінцевим поверненням у початкову точку.

Цей маршрут використовується одним водієм і однією машиною. Враховуючи, що є один склад і 4 магазини – бажаним результатом має бути 4 години (час у зупинках по 30 хв на кожний магазин + дорога). Виходячи з цього – це і буде параметрами для алгоритму, який прорахує усі можливі варіанти.

Підготовка даних:

Шари та об'єкти були створені та додані всередині ArcGIS Online: в одному шарі показано місцеположення одного складу, а у другому – 4-х магазинів.

Параметри застосовані у алгоритмі:

Для побудови маршруту

1. Вхідні шари:

- Початковий шар – склад
- Шар проміжних зупинок – риболовні магазини
- Повернення до початку – кінцевою точкою є початковий шар

2. Налаштування аналізу:

- Режим подорожі – перевезення вантажівкою
- Час відправлення – 30.05.2025, 7:00 PM
- Максимальна кількість транспортних засобів для маршруту – 1
- Максимальна кількість зупинок на один транспортний засіб – 5
- Час, проведений на кожній зупинці (хвилини) – 30
- Обмеження максимального часу на один транспортний засіб – 300 хв

3. Результатні шари:

- Назва виводу – «Fish_shops_road_build»

Результат:

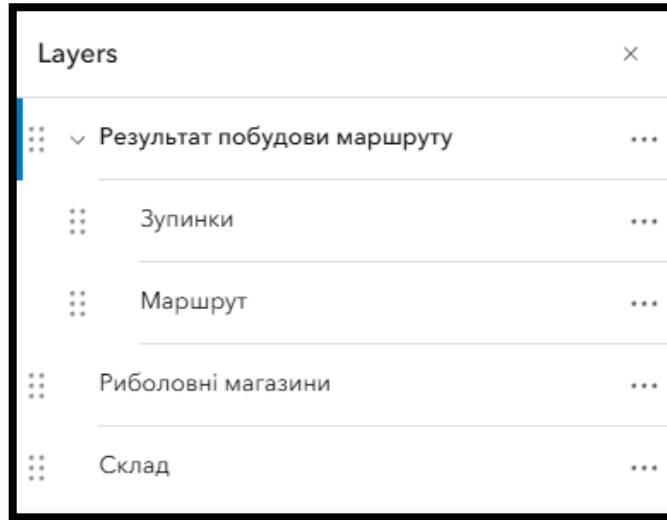


Рис 3.1. Шари проекту

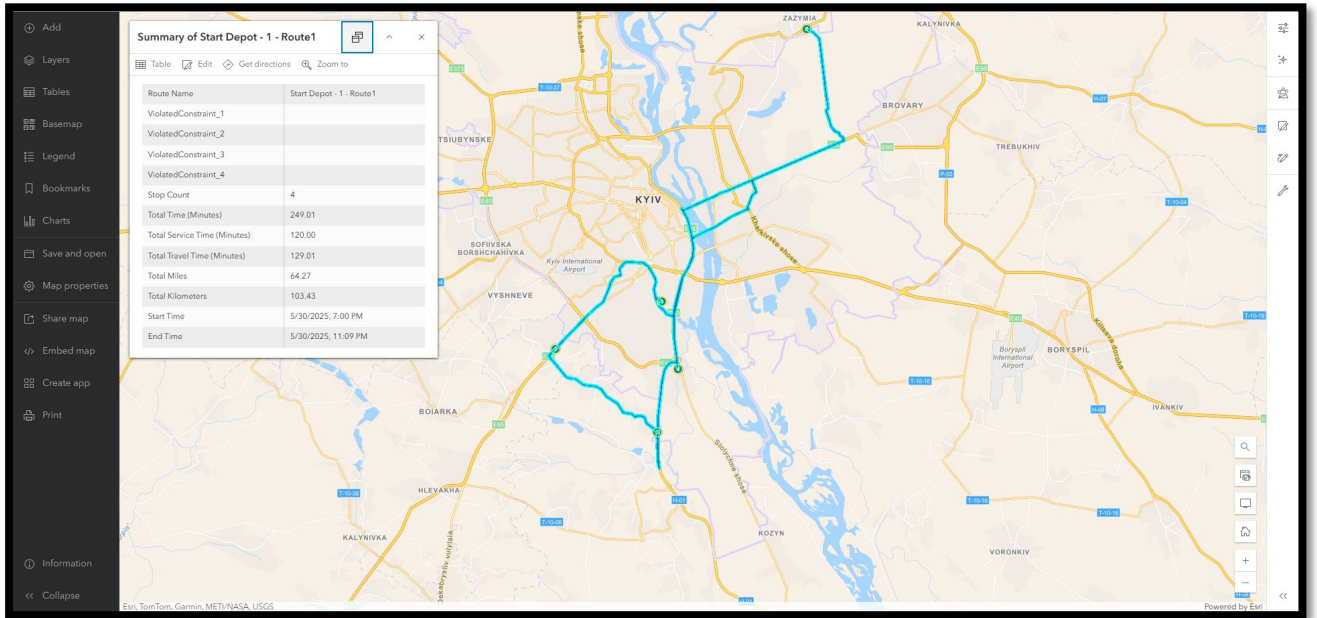


Рис 3.2. Результат побудови маршруту та його інформація в атрибутивній таблиці

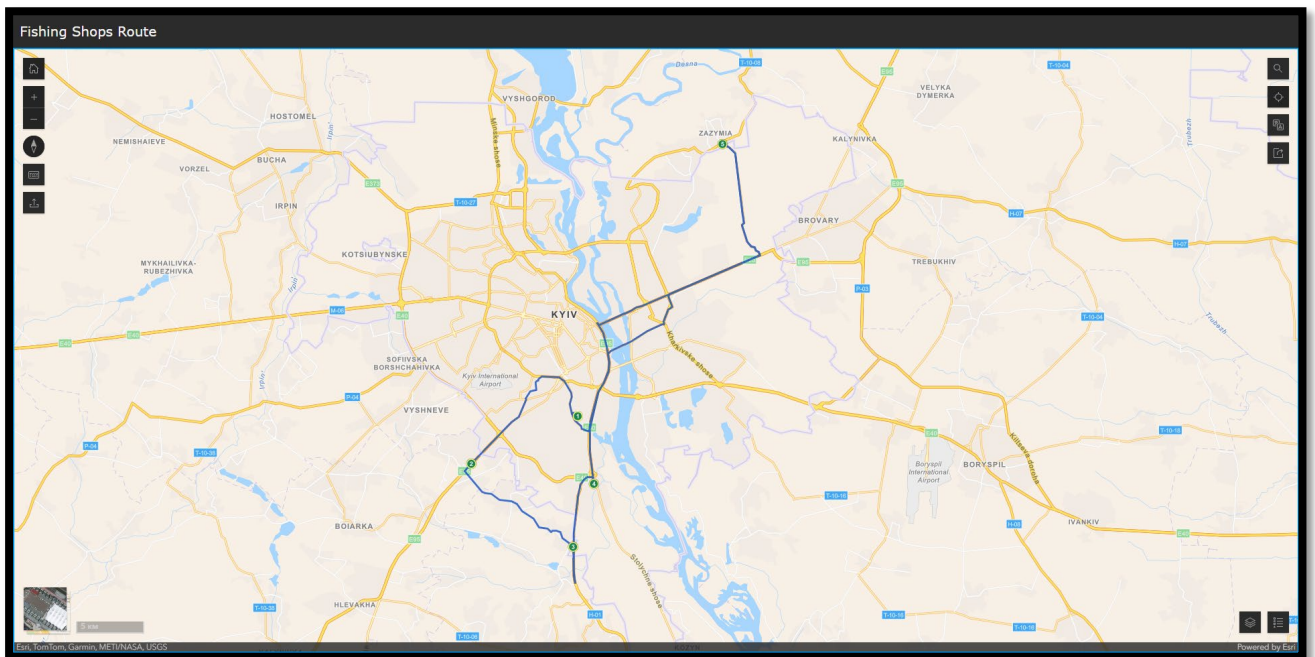


Рисунок 3.3. Інтерактивний картографічний веб-додаток

Посилання

на

карту:

<https://viu.maps.arcgis.com/apps/instant/basic/index.html?appid=5a6af7ad42cd45dc821bd860ac52fcdf>

Друга логістична задача

– є прикладом роботи логістичної мережі магазинів «АТБ» у Києві. Варто зазначити, що компанія не надає даних про кількість машин на маршруті, кількість вантажу та його тоннаж, кількість рейсів в день та для кожної машини і т.п. Але щоб трішки нівелювати це – було додано зони обслуговування у пішій доступності до магазинів (для цього було визначено оптимальну дистанцію до магазинів у трьох зонах на основі власних спостережень).

Ця задача є доволі об’ємною, оскільки кількість машин та точок на карті значно більша, ніж у минулій. Як було сказано вище: компанія не надає даних про кількість машин та інше, але у мережі чудово можна знайти склади та магазини за допомогою сервісу OSM та його серверів.

Підготовка даних:

Для визначення кількості магазинів у Києві було використано ПЗ з

відкритим кодом QGIS версії 3.40. Всередині нього був завантажений модуль «QuickOSM» для можливості пошуку векторних об'єктів, адже базова карта OSM є растром. В пошуку об'єктів на карті є одна проблема – різні назви для одного й того ж, наприклад: АТБ, АТБ-Маркет, АТБ-маркет. Крім того частина з них ще є полігонами, тому для швидкого вирішення цієї проблеми за «один крок» був створений запит всередині цього модулю:

```
[timeout:240][out:json];
(
area[name="Київ"][boundary="administrative"]-
>.searchArea;
(
node["name"~"^АТБ(-[Мм]аркет)?$",i](area.searchArea);
way["name"~"^АТБ(-[Мм]аркет)?$",i](area.searchArea);
);
);
(._;>);
out geom;
```

Результатом є 2 векторних шари (точковий та полігональний), після цього шар полігонів був перетрансформований у центроїди і об'єднаний з точковим шаром, що в кінцевому підсумку дало 161 точкових об'єктів магазинів. Шар був експортований у Esri shapefile та доданий архівом до ArcGIS Online.

При вирішенні задачі оптимізації доставки для 161 магазину АТБ, що обслуговується з одного розподільчого центру (м. Копилів), з використанням ArcGIS Online, точне розуміння та завдання параметрів маршрутизації привели до високоефективного результату.

Ключові параметри PR (Plan Routes) та їх інтерпретація:

1. Кількість зупинок на маршруті (налаштування PR в ArcGIS Online):

– Було встановлено, що кожен автомобіль здійснює маршрут, що включає 4 послідовні зупинки.

– **Важливе уточнення:** Перша з чотирьох зупинок – це склад (початкова точка). Отже, кожен автомобіль був налаштований для обслуговування максимум 3 магазинів за один рейс (Склад -> Магазин 1 -> Магазин 2 -> Магазин 3). Саме це визначення "зупинок" у рамках PR-завдання є вирішальним.

2. Розрахунок необхідної кількості автомобілів (виходячи з 3 магазинів на автомобіль):

– Враховуючи, що кожен автомобіль може обслужити максимум 3 магазини, теоретично необхідна кількість транспортних засобів для 161 магазину складає: $161 \text{ магазин} / 3 \text{ магазини/автомобіль} = 53,67$ автомобіля.

– Округлюючи у більшу сторону, отримуємо 54 автомобілі як розрахункову мінімальну потребу.

3. Параметри, задані в ArcGIS Online, та результат моделювання:

– У систему ArcGIS Online для виконання розрахунків було введено 55 автомобілів (тобто розрахункові $54+1$ автомобіль як невеликий резерв).

– Результат моделювання показав, що для обслуговування всіх 161 магазинів було задіяно рівно 54 автомобілі. 55 автомобіль залишився на базі, підтверджуючи точність початкового розрахунку.

Висновок про ефективність обраної стратегії:

Висока ефективність та точність отриманого рішення пояснюються такими факторами:

- Правильна інтерпретація параметрів ArcGIS: Ключовим моментом стало розуміння того, що задані "4 зупинки" включають склад як початкову точку, що обмежує кількість магазинів, що обслуговуються на маршруті до 3-х.

- Точний розрахунок автопарку: Розрахунок необхідної кількості автомобілів (54) було здійснено коректно, виходячи з фактичної максимальної продуктивності одного автомобіля (3 магазини).

- Оптимальне використання ресурсів: Надання системі 55 автомобілів (розрахункова потреба + невеликий буфер) дозволило ArcGIS Online ефективно розподілити навантаження та підтвердити, що 54 автомобіля достатньо.

Цей приклад наочно демонструє, наскільки важливо точно розуміти, як саме програмне забезпечення для PR інтерпретує параметри, що задаються. Коректне налаштування, засноване на реальній продуктивності (3 магазини на маршруті при 4-х етапній послідовності зі складом), призвело до практично ідеального розподілу ресурсів.

Параметри застосовані у алгоритмі:

Для побудови маршрутів

1. Вхідні шари:

- Початковий шар – склад
- Шар проміжних зупинок – магазини АТБ
- Повернення до початку – кінцевою точкою є початковий шар

2. Налаштування аналізу:

- Режим подорожі – перевезення вантажівкою
- Час відправлення – 30.05.2025, 7:00 PM
- Максимальна кількість транспортних засобів для маршруту – 55
- Максимальна кількість зупинок на один транспортний засіб – 4
- Час, проведений на кожній зупинці (хвилини) – 45
- Обмеження максимального часу на один транспортний засіб –

450 хв

3. Результатні шари:

- Назва виводу – «АТБ_shops_road_build»

Для побудови зон обслуговування

1. Вхідні шари:

- Вхідний шар – магазини АТБ

2. Налаштування аналізу:

- Режим подорожі – пішохідна відстань
- Відсікання (межі зон) – 500, 750, 1000

- Одиниці відсікання – метри
- Напрямок руху – у напрямку місць введення
- Політика перекриття – розчинення (плавний перехід)

3. Результатні шари:

- Назва виводу – «travel_areas_result_500, travel_areas_result_750, travel_areas_result_1000»

Результат:

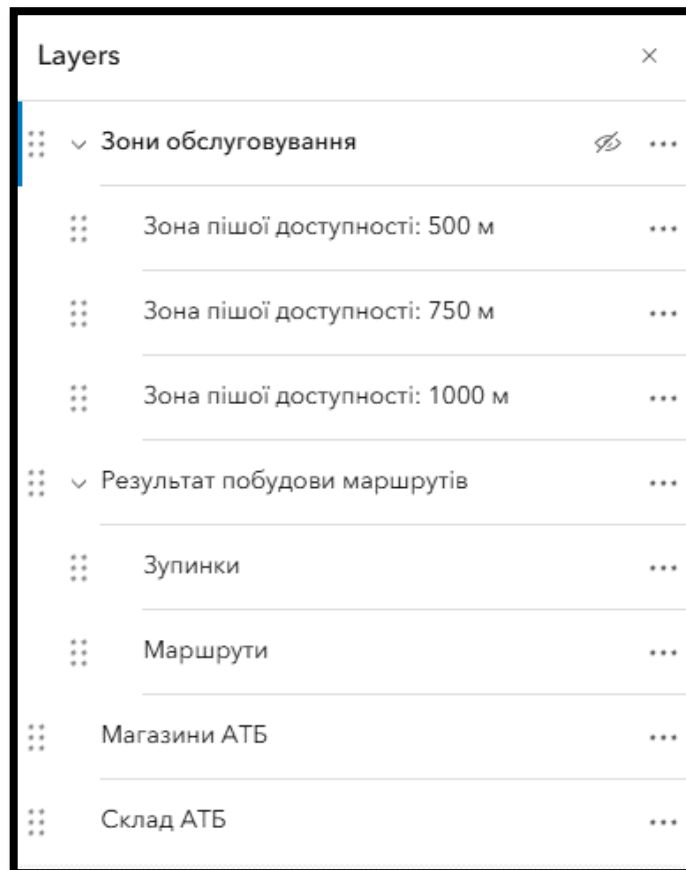


Рис 3.4. Шари проєкту

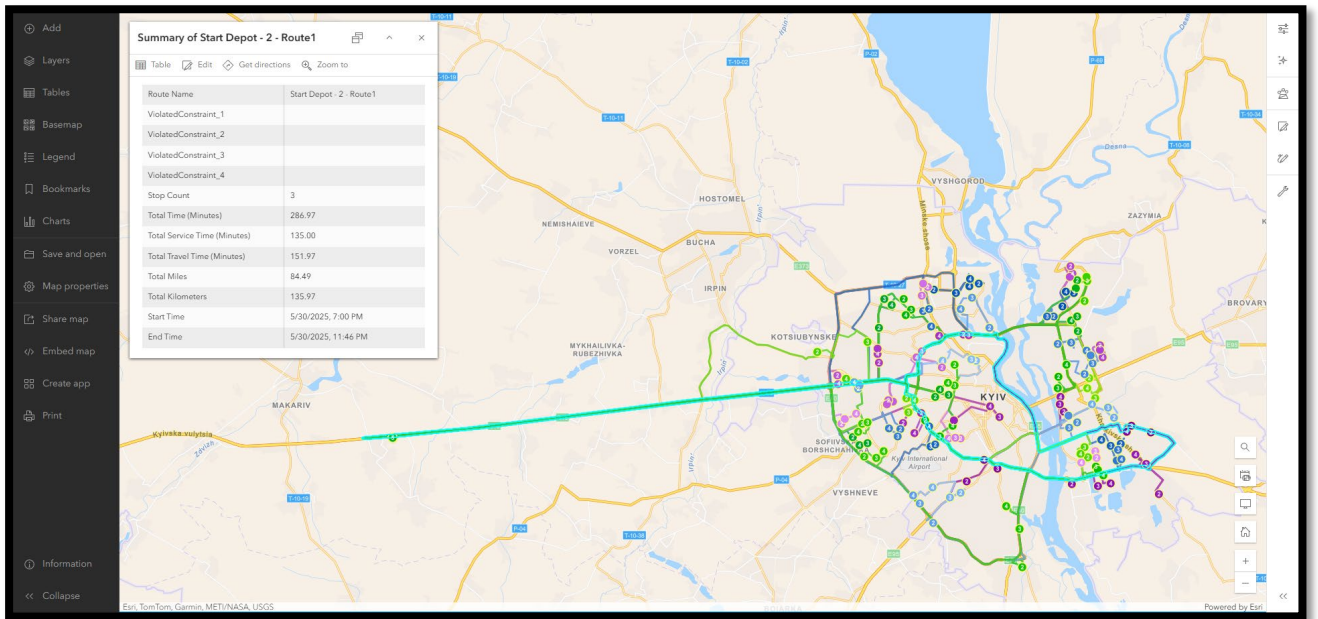


Рис 3.5. Результат побудови маршрутів та їх інформація в атрибутивній таблиці

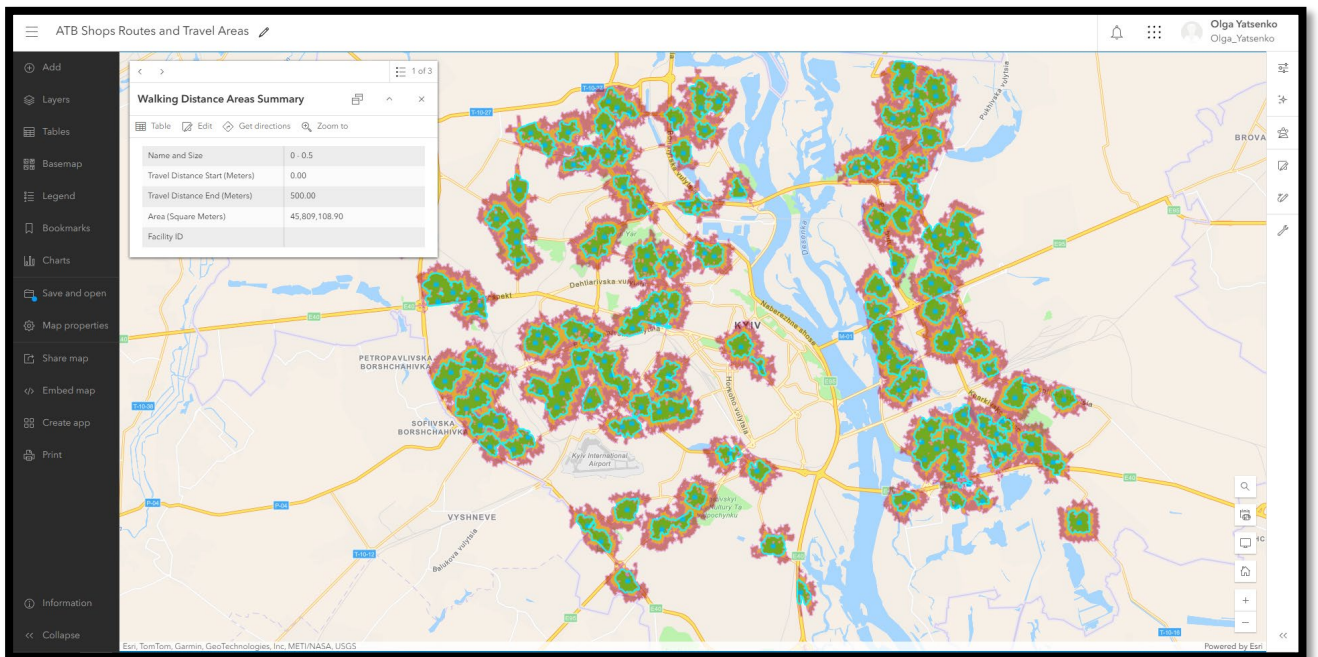


Рис 3.6. Результат побудови зон обслуговування та їх інформація в атрибутивній таблиці

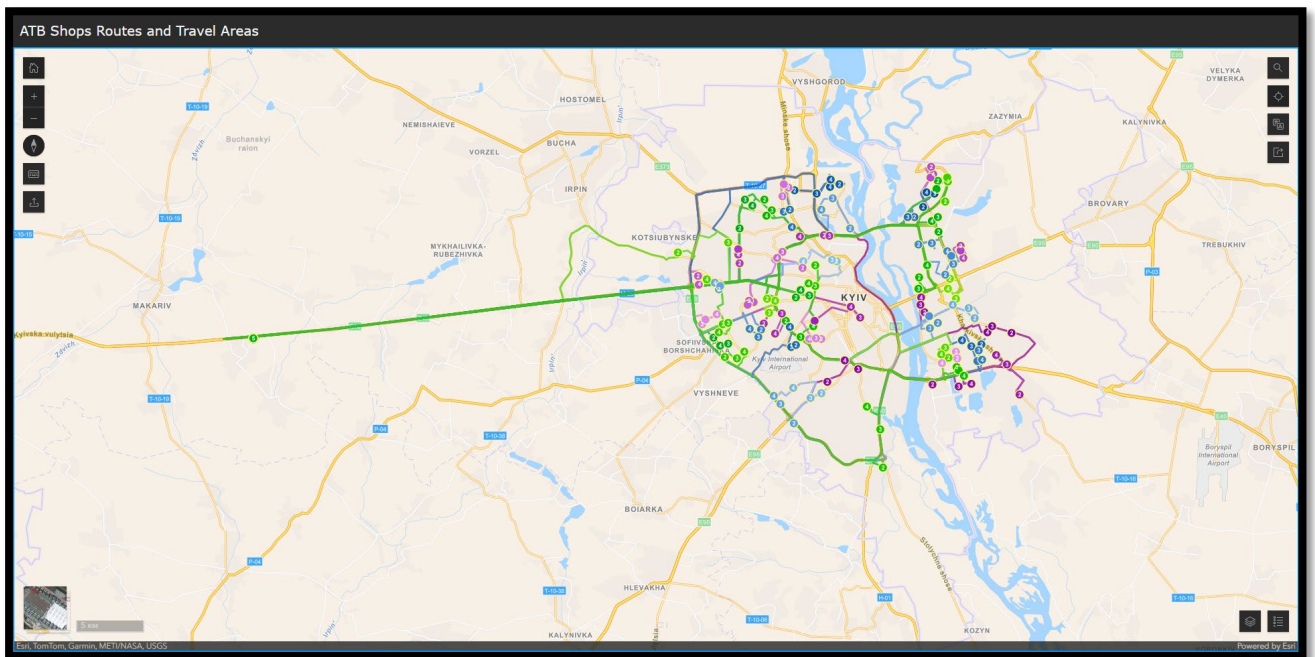


Рис 3.7. Інтерактивний картографічний веб-додаток

Посилання

на

карту:

<https://viu.maps.arcgis.com/apps/instant/basic/index.html?appid=f9ff54c22e4942f683a01dd13dc4a0af>

ВИСНОВКИ

У даній кваліфікаційній роботі бакалавра було проведено дослідження теоретичних основ та розроблено методичні підходи до картографічного забезпечення вирішення транспортно-навігаційних задач засобами сучасних веб-ГІС технологій. На основі виконаного аналізу наукової літератури, нормативно-правових актів, технічної документації, прикладів практичного застосування та виконання практичного дослідження отримано такі основні результати та сформульовано наступні висновки:

1. Проаналізовано теоретико-методологічні основи картографічного забезпечення транспортних процесів. Встановлено, що вирішення широкого спектра транспортно-навігаційних задач (від маршрутизації та моніторингу до аналізу доступності та підтримки прийняття рішень) ефективно здійснюється із застосуванням геоінформаційних систем, особливо веб-ГІС. Ключовими методологічними підходами є мережевий аналіз, просторова оптимізація, геокодування та робота з даними реального часу.

2. Охарактеризовано нормативно-правове поле України, що регулює транспортну діяльність та використання геопросторових даних. Визначено, що чинне законодавство та державні стандарти формують необхідне підґрунтя для впровадження та функціонування транспортно-навігаційних ГІС.

3. Вивчено практичний досвід розроблення та впровадження ГІС для транспортних задач як в Україні, так і за кордоном. Визначено основні перспективи розвитку транспортно-навігаційних веб-ГІС, які пов'язані з інтеграцією зі штучним інтелектом, Інтернетом речей (ІоТ), аналітикою великих даних, підтримкою автономного транспорту та цифрових двійників.

4. Систематизовано вимоги до інформаційного забезпечення транспортно-навігаційних веб-ГІС. Встановлено, що воно має включати різноманітні типи даних (базові, мережеві, точки інтересу, дані реального часу, тематичні) з різних джерел. Наголошено на важливості організації даних у

геобазах, використанні адекватних моделей (особливо мережевих), створенні метаданих та управлінні якістю інформації.

5. Обґрунтовано необхідний функціонал сучасних транспортно-навігаційних веб-ГІС (управління даними, маршрутизація, моніторинг, аналіз, інтеграція). Проведено огляд програмних рішень (комерційних та відкритих), що дозволило обрати ArcGIS Online для практичної частини, та охарактеризовано загальні вимоги до технічного забезпечення.

6. Розроблено методику практичного застосування веб-ГІС платформи ArcGIS Online для вирішення транспортно-навігаційних задач: детально проаналізовано її функціонал, запропоновано узагальнений покроковий алгоритм роботи та наведено ілюстративні приклади вирішення типових транспортних задач.

7. Виконано практичне дослідження з використанням платформи ArcGIS Online, яке успішно продемонструвало вирішення двох прикладних логістичних задач: розраховано оптимальний круговий маршрут для малої транспортної компанії з урахуванням часових обмежень та часу на обслуговування; та продемонстровано логістику великої мережі магазинів (161) з одного розподільчого центру, що включало підготовку даних з OSM засобами QGIS, розрахунок необхідної кількості транспортних засобів (54 автомобілі); також виконано побудову зон пішохідної доступності навколо магазинів. Це дослідження підкреслило важливість точного налаштування параметрів та розуміння інструментів веб-ГІС для отримання ефективних результатів.

Таким чином, у ході виконання бакалаврської роботи було досягнуто поставленої мети – досліджено теоретичні основи та розроблено методичні підходи до картографічного забезпечення вирішення транспортно-навігаційних задач засобами веб-ГІС технологій. Виконано всі поставлені завдання.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в систематизації теоретико-методологічних засад застосування саме веб-ГІС технологій для транспортних задач, узагальненні функціональних вимог до таких систем,

розробці алгоритму їх практичної реалізації на базі сучасної хмарної платформи та апробації цього алгоритму на конкретних логістичних задачах.

Практичне значення роботи полягає в тому, що її результати, розроблена методика та висновки практичного дослідження можуть бути використані при проектуванні та впровадженні транспортно-навігаційних систем у логістичних компаніях, транспортних підприємствах, органах місцевого самоврядування, а також можуть слугувати навчально-методичним матеріалом при підготовці фахівців відповідного профілю.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на поглиблене вивчення застосування AI/ML у транспортних ГІС, розробку методів роботи з HD-картами для автономного транспорту та створення цифрових двійників транспортних систем українських міст.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дослідження сучасних підходів застосування ГІС у транспортних системах / Н. О. Суворова, А. М. Валько // Технічні науки та технології. – 2021. – № 2. – С. 223–229. – Режим доступу: https://www.tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/2_2021/part_2/37.pdf
2. Про транспорт : Закон України від 10.11.1994 р. № 232/94-ВР / Верховна Рада України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80>
3. Про автомобільний транспорт : Закон України від 05.04.2001 р. № 2344-III / Верховна Рада України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14>
4. Про дорожній рух : Закон України від 30.06.1993 р. № 3353-XII / Верховна Рада України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3353-12>
5. Про Національну інфраструктуру геопросторових даних : Закон України від 13.04.2020 р. № 554-IX / Верховна Рада України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/554-20>
6. Деякі питання функціонування національної інфраструктури геопросторових даних : Постанова Кабінету Міністрів України від 26.05.2021 р. № 532 / Кабінет Міністрів України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/532-2021-%D0%BF>
7. Національна інфраструктура геопросторових даних: сучасний стан та перспективи розвитку в Україні / Ю. Карпінський, А. Лященко, Д. Макаренко, А. Черін // Землеустрій, кадастр і моніторинг земель. – 2021. – № 1/2. – С. 104–112. – Режим доступу: <http://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2021/04/15.pdf>
8. ДСТУ ISO 19101:2009 «Географічна інформація. Еталонна модель». Основи ГІС. Стандартизація географічної інформації / Ю. О. Карпінський, А. А. Лященко, Н. Ю. Лазоренко-Гевель ; М-во освіти і науки України, Київ. нац. ун-

т буд-ва і архіт. – Київ : КНУБА, 2021. – С. 95–116. – Режим доступу: https://library.knuba.edu.ua/books/15_1_21_3.pdf

9. ДСТУ EN 16157-1:2022 (EN 16157-1:2018, IDT). Інтелектуальні транспортні системи. Специфікації обміну даними DATEX II для керування дорожнім рухом та інформації про дорожній рух. Частина 1. Контекст та платформа [Електронний ресурс] / прийнято та надано чинності наказом Державного підприємства «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості» (ДП «УкрНДНЦ») від 26 липня 2022 р. № 135 ; чинний з 2023–02–01. – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98494

10. Про затвердження Порядку організації регулярних, нерегулярних та маятникових (човникових) перевезень пасажирів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні : Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 05.09.2024 р. № 966 / Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1662-24>

11. Про захист персональних даних : Закон України від 01.06.2010 р. № 2297-VI / Верховна Рада України. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2297-17>

12. Defining routes on GIS map. Documentation AnyLogic / The AnyLogic Company. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://anylogic.help/anylogic/gis/gis-defining-routes.html> (Переглянуто 01.03.2025).

13. Rodrigue J-P. A.1 – Methods in Transport Geography / J-P. Rodrigue, C. Comtois, B. Slack // The Geography of Transport Systems. – 5th ed. – Hofstra University, 2024. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://transportgeography.org/contents/methods/methods-transport-geography/>

14. Holistic analysis of the Vehicle Routing Problem: an approach for GIS-T. [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://www.researchgate.net/publication/335981384_Holistic_analysis_of_the_Vehi cle_Routing_Problem_an_approach_for_GIS-T (Переглянуто 03.03.2025).

15. Location-allocation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://en.wikipedia.org/wiki/Location-allocation> (Переглянуто 07.03.2025).

16. The Role of GIS in Transportation Infrastructure and Planning [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gisnavigator.co.uk/the-role-of-gis-in-transportation-infrastructure-and-planning/> (Переглянуто 10.03.2025).

17. EasyWay громадський транспорт [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.eway&hl=uk> (Переглянуто 12.03.2025).

18. How to build a GIS-based Decision Support System for logistics using OpenStreetMap [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.rst.software/blog/how-to-build-a-gis-based-decision-support-system-for-logistics-using-openstreetmap> (Переглянуто 13.03.2025).

19. Use of Geographic Information System (GIS) for Public Transit [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.iunera.com/kraken/public-transport/geographic-information-system-gis-public-transit/> (Переглянуто 15.03.2025).

20. Best Application of GIS Mapping in Traffic Management System [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://proffereng.com/application-of-gis-mapping-in-traffic-management-system/> (Переглянуто 16.03.2025).

21. Case Studies : GIS in Transportation [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.gis.fhwa.dot.gov/case_studies/Mobile_Applications_for_GIS_Case_Studies.aspx (Переглянуто 28.02.2025).

22. Case study: ArcGIS enhanced data capability & faster insights [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.alluxio.io/customer-stories/arcgis> (Переглянуто 17.03.2025).

23. Case Study: Mapbox [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.karbocom.com/case-study/case-study-mapbox/> (Переглянуто 24.02.2025).

24. Top 10 Trends in GIS Technology for 2025 [Електронний ресурс] // LightBox : [веб-сайт]. – 2025. – February 4. – Режим доступу: <https://www.lightboxre.com/insight/top-10-trends-in-gis-technology-for-2025/> (Переглянуто 14.02.2025).

25. How to Use Big Data Analytics in Transportation Planning [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://attractgroup.com/blog/big-data-analytics-in-transportation-planning/> (Переглянуто 10.05.2025).

26. Online High-Definition Map Construction for Autonomous Vehicles: A Comprehensive Survey [Електронний ресурс] / [Hongyu Lyu, Julie Stephany Berrio Perez, Yaoqi Huang et al.] // MDPI Sensors. – 2024. – Vol. 24, iss. 1. – Art. 15. – Режим доступу: <https://www.mdpi.com/2224-2708/14/1/15>

27. Geospatial Industry Trends and Developments that Defined 2024 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gogeomatics.ca/geospatial-industry-trends-and-developments-that-defined-2024/> (Переглянуто 16.12.2024).

28. Методичні рекомендації щодо оприлюднення геопросторових даних та метаданих на національному геопорталі національної інфраструктури геопросторових даних [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://decentralization.gov.ua/uploads/library/file/752/%D0%B3%D0%B5%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%B7.pdf>

29. OpenStreetMap [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/OpenStreetMap> (Переглянуто 16.03.2025).

30. TomTom [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/TomTom> (Переглянуто 17.03.2025).

31. «Floating car data» чи що то за «Плаваючі дані про автомобілі»? / ПроМобільність : [веб-сайт]. – 2020. – 7 жовтня. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pro-mobility.org/dumka/floating-car-data/>

32. Онищенко С. М. Геоінформатика і ГІС : конспект лекцій [Електронний ресурс] / С. М. Онищенко ; Одеський державний екологічний університет. – Одеса : ОДЕКУ, 2016. – Режим доступу: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/707/1/OnischenkoSM_Geoinformatika_ta_GIS_KL_2016.pdf

33. Network Analyst public transit data model / Документація ArcGIS Pro Esri. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pro.arcgis.com/ru/pro-app/3.3/help/analysis/networks/transit-data-model.htm> (Переглянуто 27.01.2025).

34. What is a Network Data Model? / Examples, Pros and Cons Datamation : [веб-сайт]. – 2023. – December 14. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.datamation.com/big-data/what-is-a-network-data-model-examples-pros-and-cons/>

35. Threatt T. ISO 19115 Metadata : PowerPoint Presentation / SlideServe : [веб-платформа]. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.slideserve.com/threatt/iso-19115-metadata-powerpoint-ppt-presentation>

36. Network analysis services / ArcGIS Enterprise Documentation. Version 10.5. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://enterprise.arcgis.com/en/server/10.5/publish-services/linux/network-analysis-services.htm>

37. An overview of the Spatial Analyst toolbox / ArcGIS Pro Documentation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm>

38. Compute and storage capacity / ArcGIS Velocity Documentation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://doc.arcgis.com/en/velocity/reference/compute-and-storage-capacity.htm>

39. 2021 Travel Monitoring Report Data Dashboard Series / ArcGIS StoryMaps. – 2021. – November 8. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://storymaps.arcgis.com/stories/df27d372efef45b4b4181ac213c54c6b>

40. ArcGIS Field Maps Overview / Esri UK : [веб-сайт]. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esriuk.com/en-gb/arcgis/products/arcgis-field-maps/overview>

41. ArcGIS Navigator Overview / Esri : [веб-сайт]. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-navigator/overview>