

ISSN 2518-7325 (Online), ISSN 2306-1677 (Print)

Землеустрій, кадастр і моніторинг земель

Отримано: 27.03.2026; Прийнято: 14.04.2026; Опубліковано: 30.06.2026;

<http://dx.doi.org/10.31548/zemleustriy2026.02.05>

Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>)

УДК 338.43:004.942:332.3

**ПРОСТОРОВО-ЧАСОВА МОДЕЛЬ ВАГОВОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ
ДЛЯ ПІДТРИМКИ ЕКОНОМІЧНОГО ПЛАНУВАННЯ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ЗЕМЛЕКОРИСТУВАННЯ У
ПРИМІСЬКІЙ ЗОНІ КИЇВСЬКОЇ АГЛОМЕРАЦІЇ**

В. А. Назаренко, доцент кафедри комп'ютерних систем, мереж і кібербезпеки

E-mail: volodnz@nubip.edu.ua

ORCID: 0000-0002-7433-2484

Національний університет біоресурсів і природокористування України

Аграрний сектор України стикається з комплексним економічним і просторовим тиском: змінами у передміському землекористуванні, ускладненою та порушеною логістикою, нестабільними цінами на паливо та обмеженою мобільністю в умовах воєнного стану. Ці виклики особливо помітні в Київській агломерації, де аграрне виробництво дедалі більше залежить від швидкого перепланування в умовах змінних обмежень. У цьому дослідженні представлена та оцінена платформа маршрутизації на основі коефіцієнтів для цифрового аграрного виробництва в Україні, інтегрована в архітектуру проміжного програмного забезпечення, узгоджена з FAIR/OGC, яка консолідує потоки даних отримані із великої кількості джерел (супутникові EO, зображення БПЛА за

дозволом, телеметрія IoT, завантаженість доріг і затори, а також адміністративно-економічні реєстри тощо). Платформа функціонує як інструмент безперервної підтримки прийняття рішень. Вона дозволяє користувачам гнучко налаштовувати маршрути за чотирма критеріями (час, прямі витрати, викиди CO₂e та операційні ризики), тоді як алгоритм автоматично враховує просторові та безпекові обмеження за допомогою жорстких заборонених зон та змінних коефіцієнтів для правильного налаштування модуля обробки даних.

Проведено імітаційне сценарне моделювання роботи алгоритму відбувалося на основі часових даних чотирьох тижнів у приміській зоні Києва з використанням контрольованого сценарію з трьома тижневими шаблонами: базовим (А), стресовим (В): високі ціни на паливо та вищий транспортний ризик) та скоригованим на сталий розвиток (С). Проміжне програмне забезпечення (ПЗ) підтримувало безперервне генерування рекомендацій під час періодичної доступності БПЛА та короткочасної недоступності мережі, застосовуючи перевірку заповнення баз даних та пересилання, асинхронне оновлення та опрацювання часових рядів даних; експортовані повідомлення про маршрути можна було відтворити як CSV/GeoJSON з повним походженням. Аналіз змодельованих сценаріїв показав високу залежність логістичних витрат за тиждень від зміни цін на пальне. Зокрема, порівняно з базовим сценарієм А, прямі витрати зросли на 12,44% у сценарії В та на 6,22% у сценарії С. Водночас гнучке налаштування коефіцієнтів дозволило зберегти стабільний час проходження маршрутів (загальний час у дорозі для В і С навіть зменшився на 1,15%). Крім того, система забезпечила високу точність планування (понад 95% завдань виконано у задані часові вікна) та повністю уникнула маршрутизації через заборонені зони завдяки застосуванню жорстких просторових обмежень. Загальні показники CO₂e фіксувалися стабільними у різних сценаріях за уніфікованих коефіцієнтів викидів,

що підкреслює необхідність диференційованих низьковуглецевих діапазонів або баз даних у майбутніх пілотних симуляціях.

Результати свідчать, що стандартизоване проміжне ПЗ та маршрутизація на основі вагових коефіцієнтів може слугувати практичним інструментом управління просторовими даними та аграрною економікою, поєднуючи просторові обмеження, динаміку витрат та індикатори контролю сталості у межах одного операційного робочого процесу.

***Ключові слова:** цифрове сільське господарство, маршрутизація на основі вагових коефіцієнтів, проміжне ПЗ, інтеграція UAV–IoT–супутникового забезпечення, приміські зони міста Києва, логістичні витрати, зміна призначення у використанні земель, сумісність FAIR/OGC, підтримка прийняття рішень, показники сталого розвитку.*

Вступ. Аграрний сектор України в сучасних умовах стикається з комплексом економічних тисків і змінами у землекористуванні: перетворенням використання земель в урбанізованих регіонах, порушеною просторовою логістикою, постійно змінними витратами на паливо та обмеженою мобільністю в умовах воєнного стану. Ці виклики особливо помітні у київській агломерації, де стале управління землями сільськогосподарського призначення дедалі більше залежить від швидкого просторового перепланування. У цьому дослідженні представлено та оцінено просторово-часову структуру маршрутизації із зваженими індексами, яка розроблена для управління використанням земель сільськогосподарського призначення в Україні. Система інтегрована у проміжну архітектуру ПЗ, узгоджену з FAIR/OGC, яка консолідує потоки даних, отримані із великої кількості джерел (супутникове спостереження Землі, зображення БПЛА, телеметрія IoT та кадастрові реєстри). За допомогою такої платформи реалізується маршрутизація як безперервний сервіс підтримки прийняття рішень у сфері управління земельними ресурсами, що дозволяє користувачам налаштовувати змінні параметри за чотирма

критеріями: час, прямі витрати, викиди вуглецю (CO₂e) та просторові ризики. У той же час необхідно неухильно дотримуватися обмежень у землекористуванні та питань безпеки за допомогою накладання відповідних просторових обмежень та параметрів.

У статті пропонується підхід з використанням маршрутизації вагових коефіцієнтів у режимі реального часу, інтегрований у FAIR/OGC проміжну архітектуру для цифрового сільського господарства в Україні. Під питомими коефіцієнтами ми маємо на увазі програмну систему, налаштовану схему з багатьма критеріями, яка оптимізує маршрути та призначення завдань у чотирьох практичних вимірах: час, прямі витрати, викиди, еквівалентні CO₂ та операційні ризики. При цьому враховуються плани посівів та обмеження інфраструктури. Шар абстракції проміжного ПЗ гарантує, що потоки даних отримані із великої кількості джерел (ортомозаїки БПЛА та індекси рослинності, продукти класу Sentinel, телеметрія IoT, кадастрові/земельні шари, трафік і ціни на паливо) можуть бути виявлені, пов'язані та використані через сумісні сервіси, а не спеціалізовані конвеєрні сервіси. Така архітектура є апріорі модульною, де основні системні сервіси можна впроваджувати поступово. Це дозволяє виробникам і місцевим органам влади починати її застосування з малого (наприклад, з одного підприємства чи кооперативу) і масштабувати поступово у міру покращення якості даних та інституційної довіри.

З точки зору економічної політики, потреба у такій платформі є негайною. Рішення щодо процесів транспортування та використання техніки мають значний вплив на фінансові питання через волатильність цін та зміни у маршрутизації транспортних потоків, що на сьогодні пов'язані з безпекою. Кожен неоптимальний кілометр збільшує вартість і викиди; кожний пропущений мікродіапазон (наприклад, обприскування, зрошення, догляд за рослинами тощо) зменшує врожайність і стабільність показників. Модель маршрутизації, яка може поглинати актуальні витрати (діапазони грн/км, отримані з цін на паливо та класи машин),

відображати затори або обмежені зони, а також впровадити показники сталого розвитку, пропонує зручний шлях до короткострокових заощаджень і екологічної безпеки. Важливо й те, що використання єдиної стандартизованої бази дозволяє верифікувати результати відповідно до вимог державних політик та міжнародних систем сертифікації (наприклад, SAFA, IPCC AFOLU чи Farm-to-Fork).

З точки зору землекористування, київська агломерація є базою для проведення таких досліджень. Регіон демонструє швидкі зміни у просторовому плануванні, змішані формати господарювання на аграрних підприємствах і доступність різноманітних даних через операційні обмеження. Автори розглядають це не як обмеження, а як проектну вимогу: система має залишатися корисною за неоптимальних операційних умов (обмеження БПЛА, змінна мережева підключеність, часткові набори даних) шляхом повернення стану системи до даних супутникових і наземних сенсорів. Такі системи повинні підтримувати кешування останніх станів і планувати асинхронні оновлення систем і даних. Такий принцип архітектури стійкості типовий для проміжного ПЗ (черги подій, лінія метаданих, буферизація меж) та рушія маршрутизації (складнощі з урахуванням ризиків та опції зі змінами даних), що може забезпечити безперервність операцій, підтримуючи прийняття рішень тоді, коли об'єктивні якісні та актуальні дані тимчасово недоступні.

З точки зору управління землями сільськогосподарського призначення, маршрутизатор вже не є просто проблемою транспортної логістики. Він є критично важливою складовою для динамічного управління просторовими даними. У приміських зонах, таких як Київська агломерація, ділянки с.-г. призначення часто фрагментуються через розширення житлової інфраструктури, ведення військових дій тощо. Відповідно, будь-яка логістична структура має слугувати просторовому кадастру, забезпечуючи чітку відповідність руху техніки, динамічним обмеженням землекористування, природоохоронним зонам та регіональним нормам безпеки. Отже, основною метою цього дослідження є розробка моделі оптимізації

маршрутизації, яка інтегрує складні просторові обмеження землекористування у цілісну, параметричну систему підтримки прийняття рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останнє десятиліття цифровізація аграрної сфери пройшла етапи від окремих експериментальних рішень до комплексних цифрових платформ, які поєднують дистанційне зондування, сенсорні мережі, моделі підтримки прийняття рішень та цифрові сервіси для управління виробничими процесами. У сучасній науковій літературі простежуються щонайменше чотири взаємопов'язані напрями, які є безпосередньо релевантними для тематики цього дослідження: 1) цифрове та точне землеробство на основі EO/UAV/IoT; 2) інтероперабельність даних, сервісів і цифрових платформ; 3) системи підтримки прийняття рішень і цифрові двійники в Сільське господарство 4.0; 4) маршрутизація з багатьма критеріями, зелена логістика в умовах просторових і ресурсних обмежень. Така структура огляду є важливою, оскільки запропоноване авторами у статті рішення перебуває саме на перетині цих чотирьох напрямів, а не належить лише до одного з них.

Перший напрям пов'язаний із розвитком точного землеробства та цифрового моніторингу агровиробництва. У роботі Awais et al. (2025) цифрові двійники та технології розумного землеробства розглядаються як засоби переходу від фрагментарного збору даних до цілісного, модельно-орієнтованого управління аграрними системами. Аналогічно Miller et al. (2025) акцентують увагу на тому, що сучасні IoT- та AI-рішення в аграрному секторі вже не обмежуються окремими датчиками, а формують інтегровані системи «розумного» спостереження за виробничим середовищем. У концептуально важливому огляді Zhai et al. (2020) системи підтримки прийняття рішень для Сільського господарства 4.0 описані як перехід від простого моніторингу до цифрових керованих виробничих рішень. Це означає, що сучасні дослідження все менше зосереджуються лише на фіксації стану поля, а все більше на перетворенні даних у дієві управлінські дії.

Окремий блок досліджень присвячений ролі БПЛА та супутників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) у точному землеробстві. Agrawal and Arafat (2024) аналізують технології БПЛА на базі штучного інтелекту як інструмент високодетального збору інформації для управління аграрними процесами, тоді як Guebsi et al. (2024) систематизують застосування БПЛА, відповідні технології та обмеження їх використання у точному землеробстві. Ці дослідження показують, що БПЛА є особливо цінними для локальної, високоточної діагностики стану посівів, виявлення неоднорідностей і підтримки оперативних рішень на рівні окремих ділянок. Водночас супутникові джерела забезпечують регулярність, масштабованість і стійкість спостереження. Саме тому в актуальних дослідженнях формується тенденція до поєднання UAV- та EO-даних, а не до їх протиставлення. Для тематики статті це принципово, оскільки маршрутизація в умовах дослідження приміської зони повинна враховувати як детальні локальні спостереження, так і регулярні широкомасштабні бази даних.

Другий важливий напрям стосується цифрових двійників, інтегрованих сенсорних екосистем і переходу до даних, придатних для автоматизованого планування. Aich et al. (2022) визначають цифрові двійники в сільському господарстві як перспективний підхід до узгодження польових спостережень, моделей і цифрового керування. У схожому напрямі працюють Vanerjee et al. (2025), які пов'язують цифрові двійники з удосконаленими системами рекомендацій щодо вирощування сільськогосподарських культур та з питанням оптимізації виробничих рішень. У систематичному огляді Yousaf et al. (2023) показано, що розвиток сільського господарства 4.0 дедалі більше спирається на системи, керовані даними. Однак питання практичного впровадження, інтеграції джерел даних і переходу від аналітики до операційних рішень залишаються складними. Для теми даного дослідження це означає, що проблема вже не полягає у відсутності джерел даних як таких. Головним викликом стає перетворення розрізнених спостережень на

придатні для виконання плани дій, особливо коли йдеться про просторово обмежені сільськогосподарські операції.

Третій блок літературних джерел охоплює інтероперабельність платформ, геопросторові стандарти та управління даними. Urdu et al. (2024) розглядають узгодження архітектури інтероперабельності для цифрових агропродовольчих платформ, а Obaui et al. (2025) аналізують прагматичну сумісність як основу для взаємодії людини та машин у ланцюгах створення цінності агропродовольчої сфери. У роботі Falcão et al. (2023) інтероперабельність розглядається через концептуальну основу просторів даних та автоматизацію на базі стандартизованих архітектур. Roccatello et al. (2025) приділяють окрему увагу стандартам і протоколам IoT для точного землеробства із семантичною інтероперабельністю (semantic interoperability). Для геопросторового та сервісного виміру особливо важливою є праця Qiao et al. (2023), де в реальному часі поєднуються OGC WPS та SensorThings API для екологічного моделювання, а також робота Arz von Straussenburg et al. (2024), присвячена вдосконаленню OGC SensorThings API для прикладів застосування промислового Інтернету речей (IIoT). У сукупності ці дослідження демонструють, що стандарти OGC, SensorThings-підходи, сервісно-орієнтовані моделі та FAIR-принципи є не просто технічною надбудовою, а ключовою умовою для сумісності, відтворюваності та повторного використання просторових і сенсорних даних. Саме тому для систем, орієнтованих на землекористування, кадастрово-просторові обмеження та багатоджерельний моніторинг, питання інтероперабельності є методологічно визначальним, а не допоміжним.

Четвертий напрям формують дослідження з багатокритеріальної маршрутизації та зеленої логістики. Lin et al. (2020) у огляді сучасного стану екологічної задачі маршрутизації транспорту (GVRP) дослідження показують еволюцію від класичних маршрутних задач до моделей, що одночасно враховують витрати, час, викиди та експлуатаційні обмеження. Liu et al. (2024) розглядають

оптимізацію логістичних маршрутів зі зниженням вуглецевих викидів у контексті аграрної логістики холодового ланцюга постачань. Для теми цього дослідження їхні праці мають принципове значення, оскільки вони демонструють методологічну можливість багатокритеріального підходу до оптимізації маршрутів. Разом із тим, більшість досліджень у цьому напрямі зосереджені або на транспортній логістиці загалом, або на окремих ланцюгах постачання, тоді як для аграрного виробництва у приміських зонах досить суттєвими стають обмеження землекористування, правові режими ділянок, доступність маршрутів, локальні заборонені зони, нестабільність часу виконання польових робіт та переривчастість окремих потоків даних.

Окремо слід виділити праці, які допомагають локалізувати проблему дослідження в умовах Київської агломерації та українського контексту цифрового управління. У роботі Назаренко і Мартин (2025) аналізуються урбанізація та аграрна динаміка у Київській агломерації, що є важливим для розуміння просторового тиску на сільськогосподарське землекористування у приміських зонах. У праці Назаренко та Остроушко (2024) щодо системи управління «розумним містом» на базі мікросервісної архітектури та IoT-підходів показано значення модульних цифрових архітектур для інтеграції розподілених даних і сервісів. Ці роботи підкреслюють, що для Київської агломерації цифрове планування аграрних операцій не може розглядатися ізольовано від ширших процесів просторової трансформації територій, розвитку сервісних архітектур та взаємодії міських і приміських систем.

Узагальнення розглянутих праць дозволяє зробити кілька висновків. По-перше, у науковій літературі добре представлені дослідження, присвячені окремо моніторингу агровиробництва, БПЛА, IoT, цифровим двійникам, інтероперабельності платформ і зеленій логістиці (Aich та ін., 2022; Awais та ін., 2025). По-друге, значно менше робіт поєднують ці напрями в єдиній просторово орієнтованій системі підтримки рішень, де кадастрові та адміністративні

обмеження безпосередньо впливають на формування маршрутів і пріоритетів виконання аграрних операцій (Falcão та ін., 2023; Лін та ін., 2020; Лю та ін., 2024; Міллер та ін., 2025). По-третє, для приміських зон, подібних до Київської агломерації, додаткової ваги набувають саме ті аспекти, які у багатьох публікаціях залишаються периферійними: нестабільність доступу до даних, зміна транспортної доступності, конкуренція за простір, оперативне перепланування, а також необхідність одночасно враховувати економічні, часові, екологічні та ризикові критерії. Саме ця прогалина у сучасних дослідженнях і зумовлює актуальність розроблення вагової просторово-часової моделі маршрутизації для цифрового сільського господарства у приміській зоні Київської агломерації.

Таким чином, на відміну від наукових праць, у яких ДЗЗ/БПЛА/ІоТ-дані використовуються переважно для виявлення стану посівів або аналітичного моніторингу, у цьому дослідженні акцент зроблено на їх інтеграції в сервісну архітектуру прийняття рішень, де просторові дані, адміністративно-економічні обмеження та вагові критерії оптимізації формують основу для планування операційних маршрутів (Qiao та ін., 2023; Роккателло та ін., 2025; Урду та ін., 2024). Це дозволяє розглядати запропонований підхід не лише як цифровий інструмент логістичного моделювання, а й як елемент цифрового управління просторовими даними у складних умовах трансформації приміських територій (Юсаф та ін., 2023; Zhai та ін., 2020).

Незважаючи на значний прогрес у дослідженнях та розробці цифрових рішень в логістиці, проведений аналіз виявляє, що більшість наявних систем маршрутизації орієнтовані переважно на оптимізацію транспортних витрат ізольовано від просторового контексту і не враховують динамічних кадастрових обмежень, екологічних факторів та саме аграрного землекористування.

Мета. Метою цього дослідження є створення та імітаційна оцінка системи просторово-часової маршрутизації, спрямованої на мінімізацію логістичних витрат

агропідприємств та дотримання екологічних і кадастрових обмежень у межах сучасного точного землеробства.

Матеріали та методи досліджень. Емпіричний фокус роботи зосереджений на приміській зоні Київської агломерації (зовнішні райони міста Києва та прилеглі громади), що характеризується швидким переходом на землекористування, змішаними розмірами господарств і частими обмеженнями мобільності (Назаренко та інші 2024, 2025). Методологічна мета полягала в тому, щоб перевірити, чи може сервіс маршрутизації на основі питомих коефіцієнтів у режимі реального часу, вбудований у проміжне ПЗ, узгоджене з FAIR/OGC, безперервно генерувати дієві щотижневі плани за волатильних витрат, переривчастих даних і обмежених зон. Автори використали програмний сценарій налагодження коефіцієнтів за чотирма операційними критеріями: час, пряма вартість, CO₂e та операційний ризик, перевірений у трьох сценаріях, що відображають реалістичні цінові діапазони та доступність даних. Щоб відповідати стандартам OGC, просторові обмеження (кадастрові межі) мають зберігатися в базі даних PostGIS і відображатися через GeoServer. Маршрутизуюче (middleware) проміжне ПЗ має динамічно надсилати запити для визначення цих меж за допомогою стандартних GET-запитів Web Feature Service (WFS). Це гарантує, що дані відповідають вимогам FAIR, оскільки просторові ідентифікатори є глобально доступними і не прив'язані до закритих форматів даних. Хоча теоретична архітектура платформи розроблена для обробки мультиспектральних зображень БПЛА в реальному часі, чинні воєнні обмеження цивільного повітряного простору (воєнний стан) потребують переходу на дані супутникового спостереження Землі; в той же час сама архітектора системи має відповідні модулі для обробки різних типів вхідних зображень (ДЗЗ, БПЛА, тощо).

Автори поєднали дані багатоджерельних спостережень з адміністративно-економічними шарами (Таблиця 1). Потоки даних систем супутникового спостереження та дані отримані із БПЛА забезпечували просторовий аналіз (стан посівів, вологість/стрес) на різних масштабах; телеметрія IoT додала динаміку в

полі; адміністративні рівні, обмежені маршрути (легальна категорія земель, захищені/обмежені зони); а ринкові канали встановили параметри діапазонів вартості грн\км, які визначають логістичну мету. Там, де операції з БПЛА були обмежені (наприклад, NOTAM - Сповіднення для авіаційного персоналу/воєнні обмеження), канал знову перейшов до супутникових і наземних сенсорів; проміжне ПЗ кешувало (тимчасове зберігання) попередні стани та планувало асинхронне оновлення за потреби підключення до з'єднання.

1. Основні набори даних і їх ролі в процесі розробки системи*

Шари оброблених даних у системі	Джерело / Стандарт	Класифікація та типи даних	Роль у моделі
Sentinel-2 MSI (NDVI/EVI)	EO hub; OGC WMS/WCS	10–20 м; 5 днів	маски для опрацювання даних на рівні полів; класифіковані пріоритетні зони
Planet/Radar (якщо доступно)	WMS/WCS	3–5 м; Щоденно/щотижнево	виявлені зміни з врахуванням; вологість ґрунту (радар)
Ортомозаїки та VI БПЛА	Журнали місій; GeoTIFF; STAC	2–10 см; Завдання керуються	мікро-часові діапазони для обприскування/точкового зрошення; виявлені перешкоди
Датчики IoT (вологість ґрунту, мікро-показники)	OGC SensorThings API	Точкові сітки; 15–60 хв	правила для попереджень про зрошення/морози; уточнені часові вікна
Кадастрове та землекористування (адміністративні питання в економіці)	GeoJSON/WFS; Регістри	Полігони parcel; Щорічні	юридичні обмеження; врожай/власність; шаблони значень маршрутизації

Дорожня мережа та затори	OSM локальні потоки	границі; 5–15 хв	витрати на час у подорожі; обмежені сегменти територій; варіанти зміни маршруту
Сигнали ринку (паливо, вхідні ресурси)	Щотижневі цінові стрічки	Скаляри; Щотижнево	грн\л або грн\км попередні показники; параметри зміни сценарію
Повідомлення про безпеку/обмеження	NOTAM, цивільне оповіщення	Полігони/лінії; Подіями	зони заборони польотів/уповільнення; штрафи за ризик у маршрутизації

* підготовлено Назаренком В. на основі даних публічних досліджень

Для дотримання вимог щодо сумісності, передбачених принципами FAIR, запропоноване проміжне ПЗ, яке уникає власних, заблокованих постачальником, API. Натомість консолідація просторових даних базується виключно на стандартах Open Geospatial Consortium (OGC). Зокрема, статичні межі землекористування, адміністративні обмеження та топології дорожньої мережі отримуються як векторні шари за допомогою Web Feature Service (WFS). Динамічні екологічні дані, такі як карти вологості ґрунту, отримані за допомогою супутникового ДЗЗ, інтегруються через Web Map Service (WMS) та Web Coverage Service (WCS). Стандартизуючи вхідні потоки через ці протоколи OGC, фреймворк маршрутизації гарантує, що всі базові просторові дані залишаються доступними, сумісними та можуть бути повторно використані для вирішення подальших кадастрових та земельних питань.

Автори протестували три типові операційні сценарії, використовуючи місто Київ як транзитний транспортний вузол із такими трьома пріоритетними шаблонами:

- Базовий рівень (А) - паливо 68 грн/л; діапазон вартості «Середній (60–120 грн/км)»; вага 0,35/0,35/0,20/0,10 (час/вартість/CO₂e/ризик).

- Складні умови (висока ціна пального, витрата та ризику транспортування) (В) - паливо 92 грн/л; «Високий (120–250)»; ваги 0,25/0,45/0,20/0,10, спеціальний кейс-стаді.
- Дотримання сталого розвитку (С) - паливо 80 грн/л; «Середній»; ваги 0,25/0,30/0,35/0,10, що є перевагою для низькоемісійного підходу.

2. Демонстраційні дані для трьох типових сценаріїв по місту Києву*

Сценарій	Паливо (грн/л)	Діапазон (грн/км)	Ваги (час/вартість/CO ₂ /ризик)	Дні тижня	Примітки
Базовий (А)	68	60–120	0.35 / 0.35 / 0.20 / 0.10	довільний вівторок/чт; обробка поля у середу/п'ятницю	типовий тиждень; частковий БПЛА
Складні умови (В)	92	120–250	0.25 / 0.45 / 0.20 / 0.10	те саме, що й базовий, але з уповільненням безпеки	високий рівень палива; більш обмежені сегменти
Дотримання сталого розвитку (С)	80	60–120	0.25 / 0.30 / 0.35 / 0.10	довільний вівторок/чт; середу/п'ятниця	заданий діапазон з низьким рівнем CO ₂

* підготовлено Назаренком В. на основі даних публічних досліджень

На рисунку 1 наведено порівняльні експлуатаційні характеристики змодельованого змішаного парку техніки, що включає вантажні автомобілі та сільськогосподарські трактори. Діаграма візуалізує ключові логістичні компроміси:

вантажівки забезпечують значно вищу швидкість транзиту дорогами з твердим покриттям, тоді як трактори, незважаючи на базове споживання пального, є критично важливими для роботи на ґрунтових польових дорогах. Специфіка цих двох типів транспортних засобів дозволяє максимально точно відтворити в симуляції складні фізичні та економічні обмеження, притаманні аграрній логістиці в приміських зонах.

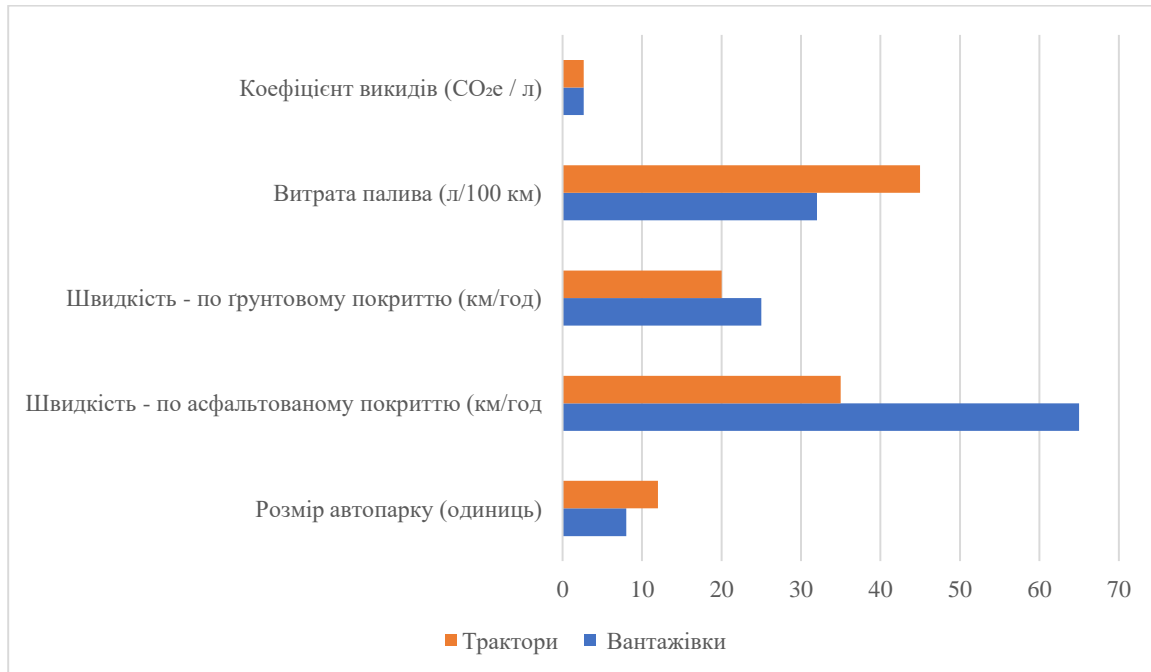


Рис. 1. Дані для двох типових видів транспортних засобів для аграрного сектору, що використовується для дослідження (на основі даних досліджень Назаренка В.)

Ядром запропонованого проміжного ПЗ є динамічна функція витрат $C(e)$, розрахована як нормалізована сума чотирьох критеріїв для кожного маршруту — часу транзиту, вартості пального, обсягу викидів, еквівалента вуглецю та операційних ризиків. Не покладаючись на довільні вхідні дані, ваги коефіцієнтів визначалися на основі пріоритетних логістичних стратегій. Симуляції були поділені на три окремі операційні сценарії з точними нормалізованими математичними вагами, наведеними в Таблиці 3. Дані, наведені в Таблиці 3, підкреслюють, що ці

три сценарії відрізняються не лише в контексті вартості пального, а й у врахуванні оптимальних пріоритетних маршрутів (суттєві відмінності між базовою, стресовою та логікою маршрутизації, скоригованою на сталий розвиток).

3. Нормовані коефіцієнти для сценаріїв маршрутизації*

Сценарій	Ціна на паливо (грн/л)	Діапазон вартості (грн\км)	Час	Прямі витрати	CO ₂ e	Ризик	Сума коефіцієнтів
Базовий (А)	68	60–120	0.35	0.35	0.20	0.10	1.00
Складні умови (В)	92	120–250	0.25	0.45	0.20	0.10	1.00
Дотримання сталого розвитку (С)	80	60–120	0.25	0.30	0.35	0.10	1.00

* підготовлено Назаренком В. на основі даних публічних досліджень

У роботі представлено симуляційне дослідження, розроблене як доказ концепції в межах триваючого проекту, що зосереджений на адмініструванні земель сільськогосподарського призначення у контексті післявоєнного відновлення та сталого розвитку. Дані щодо агломерації Києва використовувалися для пілотного моделювання, розробки політики та алгоритмів. Основні системні дані, просторові межі та логістичні обмеження, використані в симуляції, отримані з реальних даних досліджень і базуються на попередніх дослідженнях автора (Назаренко та інші, 2024, 2025).

Результати. Результати дослідження показують, що запропонована платформа маршрутизації на основі коефіцієнтів не обмежується концептуальною програмною моделлю, а функціонує як практичний інструмент підтримки прийняття рішень у складних економічних умовах і землекористуванні приміської

України. Проведене тестування в межах київської агломерації підтвердило, що інтеграція супутникового, БПЛА, IoT та адміністративно-економічних даних через проміжне ПЗ, узгоджене з FAIR/OGC, забезпечує стабільне щотижневе планування, спостереження за потоками даних і змін, а також прозору логіку маршрутизації в умовах швидкозмінних цін на паливо, обмеженої мобільності та частково застарілих баз даних. З точки зору управління землями та аграрної економіки, цінність системи полягає не лише в самому генеруванні маршрутів, а й у її здатності інтегрувати просторові обмеження, динаміку витрат і індикатори сталого розвитку в єдине операційне середовище.

Під час пілотного симуляційного тестування (тестувався чотиритижневий цикл) у приміській зоні Київської агломерації проміжне ПЗ підтримувало безперервне генерування рекомендацій, незважаючи на періодичну доступність БПЛА та короткочасну недоступність мережі. Архітектура системи враховувала випадки, коли сповіщення для авіаційного персоналу або місцеві обмеження забороняли польоти. У таких випадках система переходила на супутникову (10–20 м) та IoT-телеметрію в полі, з буферами краю збереження та пересилання, що зберігали цілісність подій, а асинхронне оновлення заповнювало високоякісні шари після відновлення каналів. Система відстежувала параметри та їхні зміни з часом, обробляючи параметри та графічні маски для кожного запуску симуляції; консультативні дані експортувалися як CSV/GeoJSON і можуть використовуватися повторно в системі. З практичної точки зору управління система забезпечувала послідовне своєчасне формування щотижневих операційних графіків. Крім того, у разі раптових перебоїв, таких як несподівані затори або різкі зміни вартості пального, система зможе швидко перерахувати маршрути, щоб підтримувати негайні щоденні управлінські рішення. Важливим для адміністрування землекористування є те, що симуляція не показала порушень обмежених земельних зон, тобто техніка ніколи не заходила в захищені або заборонені території. Водночас

система підтримувала високу операційну надійність, виконуючи щонайменше 95% запланованих завдань на с.-г. підприємствах у встановлені агрономічні терміни.

Для досягнення цих результатів різні джерела просторових даних стандартизуються на послідовній територіальній сітці. Система відстежує поточні зміни стану культур і ґрунтів. Коли вологість або стан рослин падає нижче певних норм, він автоматично планує необхідні заходи, такі як полив або обприскування. Крім того, регіональні особливості налаштування параметрів землекористування інтегровані безпосередньо у просторові набори даних у програмному середовищі. Деякі території визначені як суворо заборонені (наприклад, охоронювані екологічні смуги, військові зони або приватні ділянки), тоді як інші маршрути мають економічні штрафи (наприклад, сільські коридори з повільним рухом). Зрештою, це створює динамічну карту управління територіями, де кожен сегмент маршруту постійно оновлюється з такими операційними та економічними параметрами:

$$c_e = \alpha_t * t_e + \alpha_c * X_{UAN} / km_e + \alpha_{CO2} * k_e + \alpha_r * \rho_e \quad (1),$$

, де вагові коефіцієнти α набувають значень до 1, t_e час у дорозі, X_{UAN}/km_e - прямі витрати конкретної транспортної компанії, k_e еквівалент викидів CO_2e на кілометр (коефіцієнт палива/викидів), і ρ_e це штрафний коефіцієнт ризику, зумовлений безпековими умовами, рельєфом або просторовими обмеженнями. Слід зазначити, що розрахунок на основі рівняння 1 є частиною обробки даних розробленою програмною системою (програмний застосунок представлений на рисунках 3 і 4).

Запропоновано розробку багатоцільового гібридного найкоротшого шляху/VRP з термінами обслуговування. Для невеликих автопарків і щоденних поїздок система використовує найкоротший шлях з установкою етикеток і часовими вікнами (SP-TW) на обрізаному графіку; для щотижневих планів ми створюємо щоденні під задачі та застосовуємо ітеративну евристику «жадібність плюс ремонт», засновану на рішеннях SP-TW. Кожний коефіцієнт оцінюється за (c_e) (1), оновлюючись щогодини з урахуванням заторів і щодня з новими ціновими

діапазонами. Коли дані IoT/БПЛА відсутні або вхідні дані (за допомогою останніх супутників або аерофотознімків) відсутні, підтримує життєздатність і позначає невизначеність у попередженні.

Приклад маршрутизації та методу планування (алгоритм представлений на рисунку 1):

1. Проведення збору даних з різних джерел і приведення їх до одного формату: супутник/IoT/ручне введення економічних даних (UAV, якщо доступно).
2. Далі система визначає, де і що можна робити: створює “маски” (заборонені зони, пріоритетні ділянки) і додає “штрафи” для проблемних відрізків маршруту (затори, ділянки із підвищеними ризиками, обмеження).
3. На кожен день формується список конкретних завдань, наприклад, полив / обприскування / інспекція, і для кожного завдання задаються часові вікна, коли його реально виконати.
4. Система оновлює вартість перевезень (за поточними цінами/діапазонами грн/км) і оцінку викидів CO₂e (за коефіцієнтами палива), після чого застосовує ваги користувача: що важливіше - час, гроші, екологія чи ризики.
5. Потім алгоритм знаходить кілька потенційних маршрутів, а далі вносить подальші зміни у параметр(и): перевіряє місткість техніки, порядок виконання, реалістичність графіка та обмеження.
6. Після цього система порівнює варіанти за чотирма критеріями (вартість, час, CO₂e, ризик), обирає найкращий і публікує план/рекомендації.
7. Наостанок система зберігає повну історію (які дані і які параметри дали це рішення), а якщо частина даних була недоступна, запускає оновлення у фоновому режимі і автоматично перераховує план після надходження інформації.

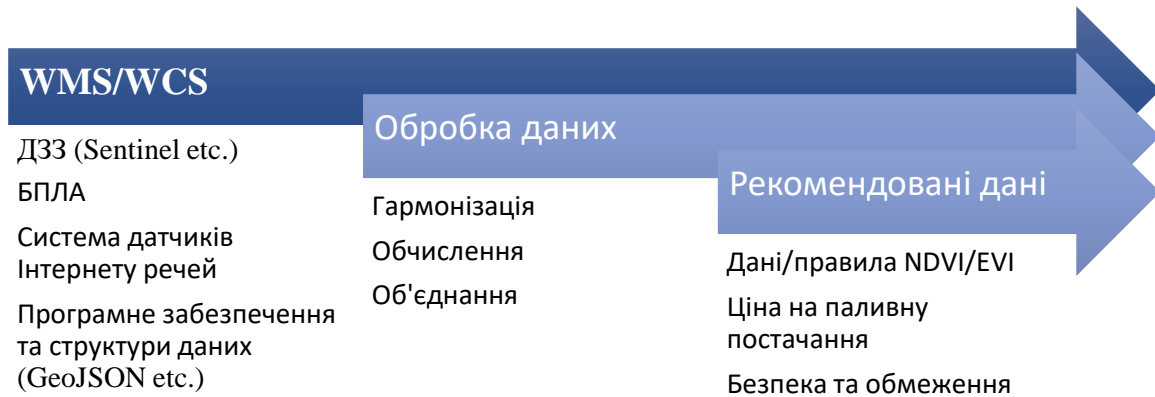


Рис. 2. Потік даних від проміжного ПЗ до маршрутизації (на основі дослідницьких даних Назаренка В.)

Рисунок 2 ілюструє потік даних між проміжним програмним забезпеченням до маршрутизації, де Web Map Service (WMS) інтегрує візуальні просторові шари (такі як межі землекористування та дорожні мережі), а Web Coverage Service (WCS) керує динамічними, багатовимірними екологічними даними (наприклад, сітки вологості ґрунту або супутникові знімки).

Автори порівнювали сценарії тижневих підсумків і щоденного розподілу: витрати прямої логістики (грн), загальний час у дорозі (години), CO_{2e} (кг), рівень здійсненності (% обслуговуваних робочих місць у межах вікон) та кількість порушень обмежених меж (очікувана 0). Було прораховано дельта-КРІ (В до А, С до А), на основі чого представлено критерії для числового аналізу в контексті створення нових норм (наприклад, кг CO_{2e} за роботу, вартість за км). Сканування чутливості варіює вагу (альфа) на $\pm 0,1$, а паливо - на ± 10 гривень/л, щоб оцінити стійкість.

Було оцінено три щотижневі сценарії, питомі коефіцієнти для яких були відповідно виставлені. Симуляція відбулася на основі приміської зони Київської агломерації: А (базовий стан), В (стресовий: висока ціна пального та вищий транспортний ризик) та С (орієнтований на сталий розвиток), використовуючи однаковий набір завдань і однакові просторові обмеження маршрутизації. Значення, наведені у таблиці 4, відображають результати одного контрольованого тестового прогону для кожного сценарію, виконаного за фіксованих вхідних параметрів. Зазначимо, що ці показники слід інтерпретувати як сценарно-порівняльні демонстраційні результати, а не як статистично усереднені оцінки за серією незалежних запусків.

4. Тижневі підсумки за сценаріями (однаковий набір завдань і задані параметри) *

КРІ (одиниці)	Сценарій А (базовий стан)	Сценарій В (складні умови)	Сценарій С (фокус на сталому розвитку)
Відстань (км)	1,240	1,240	1,240
Прямі логістичні витрати (грн)	76,582	86,106	81,344
Середня вартість за кілометр (грн/км)	61.76	69.44	65.60
Загальний час подорожі (h)	89.61	88.58	88.58
CO ₂ e (кг)†	1,116.3	1,116.3	1,116.3
Виконуваність (% завдань у вікнах)	96%	95%	96%
Порушення обмежених ребер перетинів зон з обмеженим доступом	0	0	0

* підготовлено Назаренком В. на основі даних публічних досліджень

Показники викидів CO_{2e} розраховувалися на основі тижневого пробігу транспорту, обсягів спожитого пального та фіксованого коефіцієнта емісії. На даному етапі дослідження параметри автопарку та загальна довжина маршрутів були зафіксовані, тому варіативність сценаріїв впливала лише на економічну оптимізацію шляхів, залишаючи загальний рівень викидів незмінним. Аналіз перетинів зон з обмеженим доступом засвідчив абсолютно безпечну маршрутизацію. Це пояснюється архітектурою моделі: просторово обмежені та заборонені сегменти (ребра графа) автоматично вилучалися з базової мережі за допомогою жорстких просторових масок на етапі попередньої обробки даних, що апріорі унеможливило їх потрапляння до фінального розв'язку

За результатами роботи можна виділити два спостереження. По-перше, прямі витрати дуже чутливі до діапазонів цін на паливо: В збільшує тижневі витрати на 12,44% порівняно з А, а С знаходиться посередині (+6,22%). По-друге, час і CO_{2e} залишаються здебільшого стабільними на тижневому рівні для ідентичних наборів завдань, з невеликими часовими відмінностями, що виникають через профілі ваги (трохи менший час у В/С, де часова вага зменшується і тиск вартості високий). Оскільки обмежені сегменти застосовувалися як жорсткі маски, ефективність і безпека зберігалися у різних сценаріях.

5. Дельта-КРІ для тестування сценарію (відносно сценарію А)

Метрика	В проти А	С проти А
Вартість прямої логістики	+12.44%	+6.22%
Загальний час у дорозі	-1,15%	-1,15%
CO _{2e}	0.00%	0.00%
Виконуваність	-1 pp	0 pp

* підготовлено Назаренком В. на основі даних публічних досліджень

У таблиці 5 наведено докази того, що в тиждні з високими цінами на паливо та жорсткішим контролем ризиків вартість різко зростає, тоді як оперативне

коригування ваг може знизити час ($-1,15\%$) без втрати безпеки. Стабільність результатів CO_{2e} тут відображає ідентичні коефіцієнти відстані та випромінювання; коли присутні низькоемісійні діапазони, стовпець CO_{2e} стає диференціатором в реальному часі (який недоступний у пілотному тестуванні).

Хоча дані, наведені у таблицях 4 і 5, кількісно оцінюють економічні та операційні ефекти трьох сценаріїв маршрутизації, практичне значення запропонованої системи більш повно ілюструється через програмний інтерфейс і логіку сервісу, представлені на рисунках 3 і 4. Ці дані показують, як припущення моделей, ваги сценаріїв і результати маршрутизації трансформуються у орієнтоване на користувача цифрове середовище, що дозволяє планувальникам, дослідникам і місцевим керівникам переходити від не точних даних, що були отримані із різних джерел, до інтерпретованих щотижневих планів, порівняльних KPI та рекомендацій, релевантних політикам. У цьому контексті програмний продукт діє не просто як додаток до візуалізації, а як невід'ємний компонент самої методології маршрутизації.

На рисунку 3 показано основний операційний екран маршрутизації, розроблений в межах дослідження. Інтерфейс поєднує щотижневу логіку планування, налаштування сценаріїв і візуалізацію KPI в одному робочому просторі підтримки прийняття рішень. З методологічної точки зору цей екран демонструє, що планування маршруту більше не розглядається як ізольоване завдання оптимізації, а як частина ширшого цифрового середовища, де при плануванні можна одночасно коригувати ціни на паливо, коефіцієнти викидів, діапазони витрат і ваги маршруту. Такий підхід особливо актуальний для приміських сільськогосподарських систем, де конфлікти щодо землекористування, доступність доріг і економічна нестабільність вимагають частого перегляду операційних пріоритетів. Слід зазначити, що представлене ПЗ було розроблено автором із використанням програмного фреймворку ReactJS, файлів даних у форматі JSON та на даний час проходить етап тестування на ранній версії розробки та провадження. Всі

представлені розрахунки та симуляція були виконані в цьому програмно-веб застосунку (на даному етапі доступна тільки локальна версія).

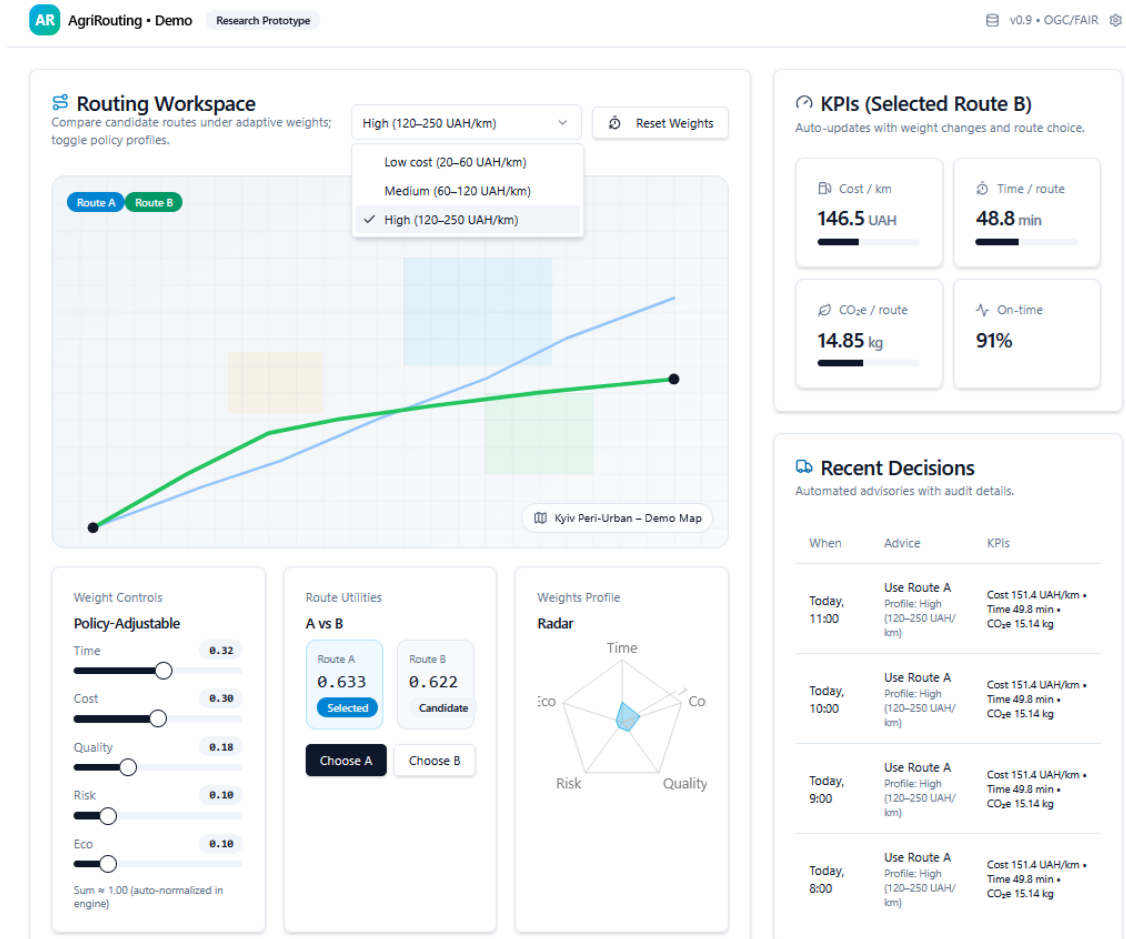


Рис. 3. Демонстрація головного екрану сервісу маршрутизації (на основі даних досліджень Назаренка В.)

На рисунку 4 проілюстровано сервіс порівняння дельта та КРІ, створений модулем тестування сценаріїв. На рисунку представлено аналітичні відмінності між базовими, стресовими та орієнтованими на сталий розвиток сценаріями маршрутизації в інтерпретованій управлінській панелі. На відміну від статичного табличного порівняння, інтерфейс дозволяє швидко визначити, як розподіл ваги впливає на прямі логістичні витрати, час у дорозі та результати здійсненності. З економічної точки зору це важливо, оскільки система робить наслідки зміни

вартості палива або оновлених обмежень маршрутизації видимими в реальному часі. Це, у свою чергу, дозволяє користувачу порівнювати не лише ефективність маршрутів, а й ширший профіль витрат альтернативних стратегій.

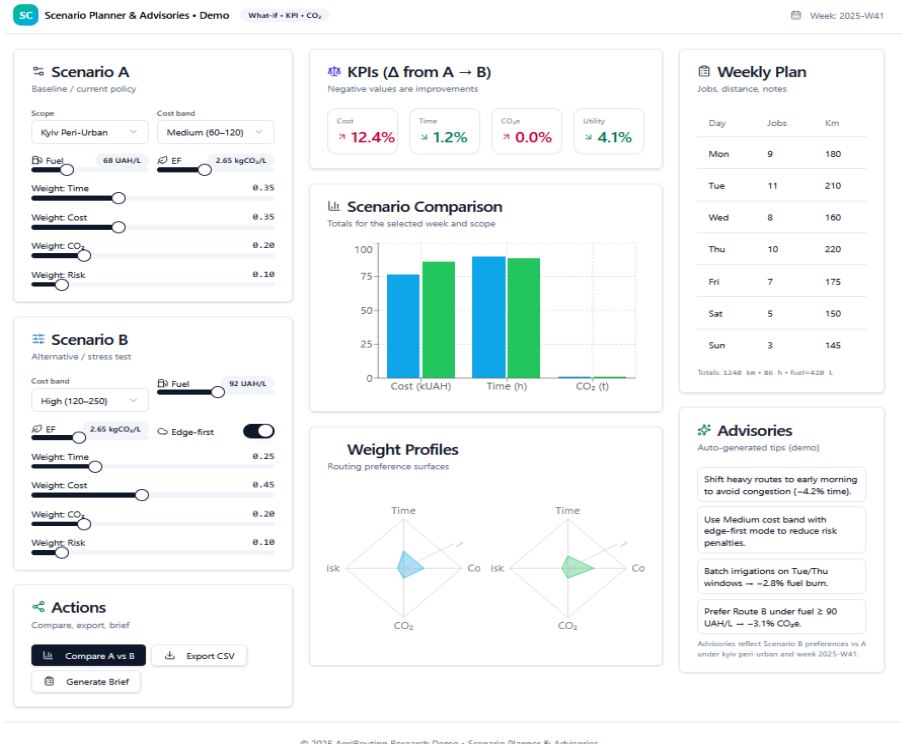


Рис. 4. Демонстрація сервісу дельта-КРІ сценарного тестування (відносно сценарію А) (на основі даних досліджень Назаренка В.)

Матеріали, представлені на рисунках 3 і 4, ілюструють, що запропонована архітектура маршрутизації має практичне застосування поза межами теоретичного моделювання. Вони демонструють, як проміжне ПЗ та рушій маршрутизації можуть бути вбудовані в реальний програмний сервіс, який підтримує планування за участю людини в циклі, тестування сценаріїв і політичну комунікацію на основі доказів. Для досліджень, що спеціалізуються на управлінні земельними ресурсами та економічними показниками, ці дані особливо корисні, оскільки вони демонструють зв'язок між просторовими обмеженнями, операційним плануванням і вимірюванням економічної ефективності. Отже, дані демонструють, що

дослідження стосується не лише алгоритмічної оптимізації, а й створення придатного цифрового інструменту для управління просторовими даними і прийняття рішень у аграрному виробництві.

Висновки. Отримані результати підтверджують тенденцію, виявлену в сучасних дослідженнях цифрового сільського господарства: аналітична цінність даних БПЛА, EO та IoT значно зростає, коли ці джерела інтегровані в орієнтовані на рішення архітектури сервісів, а не використовуються лише для моніторингу чи описової статистичної звітності. На відміну від багатьох досліджень, які зосереджені переважно на польовій діагностиці, дана робота демонструє, як просторові та економічні дані можна перетворити на рішення про операційну маршрутизацію з вимірюваними тижневими ефектами. Це наближає дослідження до систем підтримки прийняття рішень сільського господарства 4.0 та зеленої логістики, розширюючи ці підходи, враховує обмеження землекористування в приміських районах і визначені набори економічних показників, специфічні для сценарію.

Важливим результатом роботи є виявлення високої залежності тижневих логістичних витрат від вартості пального, тоді як час у дорозі в усіх тестових сценаріях залишався відносно стабільним. Це доводить, що в сучасних умовах приміської зони міста Києва саме паливна складова є головним чинником коливання логістичних витрат. Отже, при оперативному плануванні економічний фактор (ціна палива) відіграє значно більшу роль, ніж фізична відстань маршруту транспорту. Ці результати розширюють сучасні підходи до сталого логістичного планування. На відміну від традиційних моделей, що фокусуються лише на оптимізації відстані та викидів CO₂, автор продемонстрував, як саме регіональні коливання вартості пального та обмеження землекористування впливають на вибір оптимального маршруту. Отже, дане дослідження додає прикладний економічний вимір у вивчення цифрової маршрутизації, показуючи, що одна й та сама архітектура маршрутизації може слугувати як логістичним інструментом, так і

інструментом для розуміння територіальної структури витрат сільського господарства поблизу великих мегаполісів.

Водночас дана наукова робота також виявляє кілька обмежень, які визначають напрямок майбутньої роботи. По-перше, стабільність значень CO₂ у різних сценаріях свідчить про те, що в нинішній пілотній конфігурації викиди здебільшого визначаються однорідними припущеннями щодо відстані та палива, а не диференційованими низьковуглецевими діапазонами значень чи класами машин. По-друге, розрахункові сценарії мали контрольований характер і не відображали реальних сезонних коливань, графіків посівних робіт чи погодних форс-мажорів. По-третє, попри те, що програма довела свою працездатність, для остаточних висновків необхідне її ширше тестування на основі більшої кількості даних та сценаріїв, отриманих від фермерських кооперативів, місцевих громад та агросервісних компаній. Результати проведеного симуляційного моделювання підтверджують, що розроблену платформу варто розглядати як масштабовану інфраструктуру на базі проміжного програмного забезпечення (middleware). Вона є відкритою для подальшої інтеграції технологій цифрових двійників, даних про дорожній рух у реальному часі, а також систем обліку показників сталого розвитку відповідно до нормативних вимог.

Список використаних джерел

1. Agrawal J., Arafat M. Y. Transforming farming: A review of AI-powered UAV technologies in precision agriculture. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 11. Art. 664. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8110664>.
2. Aich S., Chakraborty S., Lee Y.-K., Kim H.-C. Digital twins in agriculture: A state-of-the-art review. *ICT Express*. 2022. Vol. 8, No. 3. P. 300–312. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icte.2021.11.006>.
3. Arz von Straussenburg S., Aldenhoff T., Riehle D. Improving OGC SensorThings API for industrial IoT use cases: Lessons from real-world

- scenarios. Proceedings of the 27th AGILE Conference on Geographic Information Science. CEUR-WS. 2024. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-3849/forum1.pdf>.
4. Awais M., Wang X., Hussain S., Aziz F., Mahmood M. Q. Advancing precision agriculture through digital twins and smart farming technologies: A review. *AgriEngineering*. 2025. Vol. 7, No. 5. Art. 137. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050137>.
 5. Banerjee S., Mukherjee A., Kamboj S. Precision agriculture revolution: Integrating digital twins and advanced crop recommendation for optimal yield. arXiv preprint. 2025. URL: <https://arxiv.org/abs/2502.04054>.
 6. Falcão L., Matar S., Rauch E., Elberzhager F., Koch K. Next-generation interoperability: A framework for data spaces and OPC UA-based automations. *Information*. 2023. Vol. 14, No. 8. Art. 440. DOI: <https://doi.org/10.3390/info14080440>.
 7. Guebsi R., Mami S., Chokmani K. Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. *Drones*. 2024. Vol. 8, No. 11. Art. 686. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones8110686>.
 8. Lin C., Choy K. L., Ho G. T. S., Chung S. H., Lam H. Y. Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics*. 2020. Vol. 228. Art. 107749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107749>.
 9. Liu J., Zhang D., Li X., Wang L. Distribution path optimization of carbon emission-reducing agricultural cold chain logistics based on improved GA. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2024. Vol. 12. Art. 100164. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100164>.
 10. Miller T., Mikiciuk G., Durlik I., Mikiciuk M., Łobodzińska A., Śnieg M. The IoT and AI in agriculture: The time is now—A systematic review of smart

- sensing technologies. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 12. Art. 3583. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25123583>.
11. Nazarenko V., Martyn A. Urban growth and agrarian dynamics: Evaluating the Kyiv agglomeration's economic landscape. *Economics and Business Management*. 2025. Vol. 2, No. 16. P. 24–41. DOI: <https://doi.org/10.31548/economics/2.2025.24>.
 12. Nazarenko V., Ostroushko B. Smart city management system utilizing micro-services and IoT-based systems. *Energiya*. 2024. Vol. 1, No. 71. P. 29–38. DOI: [https://doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.029](https://doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.029).
 13. Obayi R., Choudhary S., Nayak R., Ramanjaneyulu G. V. Pragmatic interoperability for human–machine value creation in agri-food supply chains. *Information Systems Frontiers*. 2025. Advance online publication. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10567-x>.
 14. Qiao Y., Ren P., Tang H., Li Z. An interoperable and service-oriented approach for real-time environmental modeling by coupling OGC WPS and SensorThings API. *Environmental Modelling & Software*. 2023. Vol. 162. Art. 105651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105651>.
 15. Roccatello E., Pagano A., Levorato N., Rumor M. State of the art in Internet of Things standards and protocols for precision agriculture with an approach to semantic interoperability. *Network*. 2025. Vol. 5, No. 2. Art. 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/network5020014>.
 16. Urdu D., Berre A. J., Sundmaeker H., Rilling S., Roussaki I., Marguglio A., Wolfert S. Aligning interoperability architectures for digital agri-food platforms. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2024. Vol. 224. Art. 109194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109194>.
 17. Yousaf H., Kayvanfar V., Mazzoni S., Elomri A. From decision support to Agriculture 4.0: A systematic review of data-driven systems and adoption

challenges. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2023. Vol. 7. Art. 1107026.
DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1107026>.

18. Zhai Z., Martínez J. F., Beltran V., Martínez N. L. Decision support systems for Agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2020. Vol. 170. Art. 105256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>.

References

1. Agrawal, J., & Arafat, M. Y. (2024). Transforming farming: A review of AI-powered UAV technologies in precision agriculture. *Drones*, 8(11), Article 664. <https://doi.org/10.3390/drones8110664>
2. Aich, S., Chakraborty, S., Lee, Y.-K., & Kim, H.-C. (2022). Digital twins in agriculture: A state-of-the-art review. *ICT Express*, 8(3), 300–312. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2021.11.006>
3. Arz von Straussenburg, S., Aldenhoff, T., & Riehle, D. (2024). Improving OGC SensorThings API for industrial IoT use cases: Lessons from real-world scenarios. In *Proceedings of the 27th AGILE Conference on Geographic Information Science*. CEUR-WS. <http://ceur-ws.org/Vol-3849/forum1.pdf>
4. Awais, M., Wang, X., Hussain, S., Aziz, F., & Mahmood, M. Q. (2025). Advancing precision agriculture through digital twins and smart farming technologies: A review. *AgriEngineering*, 7(5), Article 137. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7050137>
5. Banerjee, S., Mukherjee, A., & Kamboj, S. (2025). Precision agriculture revolution: Integrating digital twins and advanced crop recommendation for optimal yield [Preprint]. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2502.04054>
6. Falcão, L., Matar, S., Rauch, E., Elberzhager, F., & Koch, K. (2023). Next-generation interoperability: A framework for data spaces and OPC UA-based automations. *Information*, 14(8), Article 440. <https://doi.org/10.3390/info14080440>
7. Guebsi, R., Mami, S., & Chokmani, K. (2024). Drones in precision agriculture: A comprehensive review of applications, technologies, and challenges. *Drones*, 8(11), Article 686. <https://doi.org/10.3390/drones8110686>
8. Lin, C., Choy, K. L., Ho, G. T. S., Chung, S. H., & Lam, H. Y. (2020). Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics*, 228, Article 107749. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107749>

9. Liu, J., Zhang, D., Li, X., & Wang, L. (2024). Distribution path optimization of carbon emission-reducing agricultural cold chain logistics based on improved GA. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, 12, Article 100164. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100164>
10. Miller, T., Mikiciuk, G., Durlik, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in agriculture: The time is now—A systematic review of smart sensing technologies. *Sensors*, 25(12), Article 3583. <https://doi.org/10.3390/s25123583>
11. Nazarenko, V., & Martyn, A. (2025). Urban growth and agrarian dynamics: Evaluating the Kyiv agglomeration's economic landscape. *Economics and Business Management*, 2(16), 24–41. <https://doi.org/10.31548/economics/2.2025.24>
12. Nazarenko, V., & Ostroushko, B. (2024). Smart city management system utilizing micro-services and IoT-based systems. *Energiya*, 1(71), 29–38. [https://doi.org/10.31548/energiya1\(71\).2024.029](https://doi.org/10.31548/energiya1(71).2024.029)
13. Obayi, R., Choudhary, S., Nayak, R., & Ramanjaneyulu, G. V. (2025). Pragmatic interoperability for human–machine value creation in agri-food supply chains. *Information Systems Frontiers*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10567-x>
14. Qiao, Y., Ren, P., Tang, H., & Li, Z. (2023). An interoperable and service-oriented approach for real-time environmental modeling by coupling OGC WPS and SensorThings API. *Environmental Modelling & Software*, 162, Article 105651. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105651>
15. Roccatello, E., Pagano, A., Levorato, N., & Rumor, M. (2025). State of the art in Internet of Things standards and protocols for precision agriculture with an approach to semantic interoperability. *Network*, 5(2), Article 14. <https://doi.org/10.3390/network5020014>
16. Urdu, D., Berre, A. J., Sundmaeker, H., Rilling, S., Roussaki, I., Marguglio, A., & Wolfert, S. (2024). Aligning interoperability architectures for digital agri-food platforms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 224, Article 109194. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109194>
17. Yousaf, H., Kayvanfar, V., Mazzoni, S., & Elomri, A. (2023). From decision support to Agriculture 4.0: A systematic review of data-driven systems and adoption challenges. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, Article 1107026. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2023.1107026>
18. Zhai, Z., Martínez, J. F., Beltran, V., & Martínez, N. L. (2020). Decision support systems for Agriculture 4.0: Survey and challenges. *Computers and Electronics in Agriculture*, 170, Article 105256. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105256>

V. Nazarenko

**SPATIO-TEMPORAL ECONOMIC PLANNING WEIGHTED ROUTING
MODEL FOR AGRICULTURAL LAND-USE MANAGEMENT IN PERI-
URBAN ZONES: A CASE STUDY OF KYIV AGGLOMERATION**

Ukraine's agricultural sector faces a compound set of economic and spatial pressures: peri-urban land-use transformation, disrupted logistics, volatile fuel costs, and restricted mobility in wartime conditions. These challenges are especially evident in the Kyiv agglomeration, where agricultural operations increasingly depend on rapid re-planning under changing constraints. This study presents and evaluates a weights-based real-time routing platform for digital agriculture in Ukraine, integrated into a FAIR/OGC-aligned middleware architecture that consolidates multi-source data streams (satellite EO, UAV imagery when permitted, IoT telemetry, road and congestion layers, and administrative–economic registers). The platform operationalizes routing as a continuous decision-support service by allowing users to tune explicit weights across four criteria: time, direct cost, CO₂e, and operational risk, while enforcing land-use and safety restrictions through hard spatial masks and soft penalty layers.

Empirical testing was conducted over four pilot weeks in the peri-urban belt of Kyiv using a controlled-scenario design with three weekly templates: Baseline (A), Stress (B: high fuel prices and higher transport risk), and Sustainability-adjusted (C). The middleware maintained continuous advisory generation under intermittent UAV availability and short-lived network outages by employing store-and-forward edge buffers, asynchronous refresh, and lineage capture; exported route advisories were reproducible as CSV/GeoJSON with full provenance. Scenario results show strong sensitivity of weekly logistics costs to fuel-driven cost bands: compared with Scenario A, Scenario B increased direct logistics costs by 12.44%. In comparison, Scenario C increased costs by 6.22%. Tactical re-weighting protected time performance (approximately –1.15% total travel time in B and C). In comparison, feasibility remained

high ($\geq 95\%$ of jobs served within service windows), and restricted-edge violations remained zero due to enforced masks. CO₂e totals remained stable across scenarios under uniform emission factors, highlighting the need for differentiated low-carbon corridors or fleet classes in future pilots.

The results indicate that a standards-based middleware platform combined with weight-based routing can serve as a practical tool for land-use governance and agricultural economics by linking spatial constraints, cost dynamics, and auditable sustainability indicators within a single operational workflow.

Keywords: *digital agriculture, weight-based routing, middleware, UAV–IoT–satellite integration, peri-urban Kyiv, logistics costs, land-use change, FAIR/OGC interoperability, decision support, sustainability metrics.*