

Технічні науки

УДК 656.1/5

Точигін Максим Олегович

аспірант

Національного транспортного університету

Tochygin Maxim

Graduate Student of the

National Transport University

**ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ІНФОРМАЦІЙНОЇ АСИМЕТРІЇ В
МІСЬКІЙ ЛОГІСТИЦІ НА ОСНОВІ РОЗПОДІЛЕНИХ РЕЄСТРІВ
ADDRESSING INFORMATION ASYMMETRY IN URBAN LOGISTICS
USING DISTRIBUTED LEDGERS**

Анотація. Вступ. Сучасні тенденції урбанізації та стрімке зростання обсягів електронної комерції призводять до значного збільшення навантаження на транспортну інфраструктуру міст. Традиційні підходи до управління міськими вантажними перевезеннями, які базуються на централізованому прийнятті рішень та статичному плануванні, виявляються неефективними в умовах високої динаміки міського середовища. Це спричиняє низку негативних наслідків: зростання рівня заторів, погіршення екологічної ситуації через збільшення викидів забруднюючих речовин, а також зниження рівня соціального комфорту та безпеки мешканців. Вирішення цих проблем вимагає переходу до концепції сталого розвитку, що передбачає гармонійне поєднання економічної ефективності, екологічної безпеки та соціальної прийнятності логістичних процесів. Інтеграція новітніх інформаційних технологій, таких як штучний інтелект

та розподілені реєстри, відкриває нові можливості для децентралізованого, адаптивного та прозорого управління вантажопотоками. Мета. Метою даного дослідження є розробка комплексного методу формування стратегії сталого розвитку міських вантажних перевезень на основі синергії графових нейронних мереж, глибокого навчання з підкріпленням та смарт-контрактів технології блокчейн для забезпечення балансу між логістичними витратами, екологічним навантаженням та соціальним комфортом. Матеріали і методи. Теоретико-методологічною базою дослідження є системний підхід, теорія графів, марковські процеси прийняття рішень (DRL), методи багатокритеріальної оптимізації (TOPSIS) та метод ентропії. Для верифікації даних та контролю доступу застосовано принципи технології блокчейн і смарт-контрактів. Моделювання трафіку та прогнозування станів транспортної мережі виконано з використанням графових нейронних мереж (GNN). Результати. У процесі дослідження було формалізовано концептуальну архітектуру управління міськими вантажопотоками як складну багатокритеріальну задачу. Удосконалено систему критеріїв оцінки ефективності стратегії, де поряд із традиційними економічними показниками введено інтегральний індикатор сталого розвитку. Розроблено математичну модель визначення параметрів дворівневої міської логістики (з використанням мікро-хабів), яка враховує динамічні ліміти пропускної здатності екологічних зон. Запропоновано комплексний чотириетапний метод формування стратегії, який включає використання «Цифрового двійника» (Digital Twin) для імітаційного стрес-тестування раціонального вектора параметрів. Використання блокчейн-реєстру забезпечує прозору фіксацію телеметричних даних та автоматизоване управління доступом вантажівок у зони з низьким рівнем викидів (LEZ). Перспективи. Подальші дослідження будуть спрямовані на практичну апробацію розробленого

методу в реальних умовах великих транспортних вузлів, удосконалення алгоритмів децентралізованого голосування стейкхолдерів для визначення вагових коефіцієнтів та інтеграцію отриманих моделей із муніципальними системами Smart City.

Ключові слова: міські вантажні перевезення, сталий розвиток, багатокритеріальна оптимізація, блокчейн, штучний інтелект, смарт-контракти.

Summary. *Introduction.* Modern urbanization trends and the rapid growth of e-commerce volumes lead to a significant increase in the load on the transport infrastructure of cities. Traditional approaches to urban freight transport management, based on centralized decision-making and static planning, prove inefficient in highly dynamic urban environments. This causes negative consequences: increased congestion, environmental degradation, and decreased social comfort. Solving these problems requires transitioning to sustainable development. The integration of advanced IT, such as AI and distributed ledgers, opens new opportunities for adaptive flow management. *Purpose.* The purpose of this study is to develop a comprehensive method for forming a strategy for the sustainable development of urban freight transport based on the synergy of graph neural networks, deep reinforcement learning, and blockchain smart contracts. *Materials and methods.* The theoretical and methodological basis of the study is a systems approach, graph theory, Markov decision processes (DRL), multi-criteria optimization methods (TOPSIS), and the entropy method. Blockchain technology is applied for data verification and access control. Traffic modeling is performed using graph neural networks (GNN). *Results.* The conceptual architecture of urban freight flow management was formalized as a complex multi-criteria problem. The system of criteria for evaluating strategy efficiency was improved. A mathematical model

for determining the parameters of two-tier city logistics was developed, taking into account the dynamic capacity limits of environmental zones. A comprehensive four-stage strategy formation method is proposed, including the use of a Digital Twin for simulation stress testing. Prospects. Further research will be directed towards the practical approbation of the developed method in real conditions of large transport hubs and the integration of the obtained models with municipal Smart City systems.

Key words: *urban freight transport, sustainable development, multi-objective optimization, blockchain, artificial intelligence, smart contracts.*

Постановка проблеми. Традиційні моделі управління міською логістикою базуються на централізованому прийнятті рішень, що в умовах високої динаміки міського середовища призводить до затримок та неоптимального використання інфраструктури. Зростання попиту на вантажні перевезення генерує негативні екстерналії, такі як викиди парникових газів, затори та зниження рівня безпеки руху. Потреба у гармонізації інтересів усіх стейкхолдерів вимагає переходу до систем децентралізованої координації з використанням новітніх інформаційних технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблемам міської логістики присвячено значну кількість наукових праць. Фундаментальні основи дворівневої міської логістики закладено у дослідженнях T.G. Crainic [11, с. 182]. Використання графових нейронних мереж (GNN) для прогнозування заторів та екологічного навантаження детально розглянуто у роботах Varhoumi et al. [1, с. 46]. Питання інтеграції блокчейн-технологій для забезпечення достовірності даних у транспортних системах досліджували Miron et al. [4, с. 341] та Zhou et al. [5, с. 1121]. Багатокритеріальна оптимізація екологічних та економічних параметрів висвітлена у роботах Akkad et al. [2, с. 112] та Ishii et al. [3, с. 104]. Водночас соціальні аспекти функціонування вантажного

транспорту ґрунтовно досліджено у працях Davidich et al. [7, с. 103001] та Malinovsky et al. [6, с. 5]. Незважаючи на значний доробок, проблема комплексної інтеграції методів штучного інтелекту та смарт-контрактів у єдиний метод формування стратегії сталого розвитку міських перевезень залишається невирішеною.

Формулювання цілей статті. Метою даної статті є розробка методу формування стратегії сталого розвитку міських вантажних перевезень, який дозволяє інтегрувати механізми децентралізованого контролю на основі блокчейн-технологій та інструменти адаптивного прогнозування з використанням штучного інтелекту для оптимізації логістичних процесів.

Виклад основного матеріалу. У межах формування стратегії сталого розвитку міських вантажних перевезень, першочерговим завданням є математична формалізація процесу управління потоками. Згідно з сучасними підходами, міська логістична система розглядається як складна динамічна мережа, де кожен елемент має відповідати принципам екологічності, економічної ефективності та соціальної прийнятності.

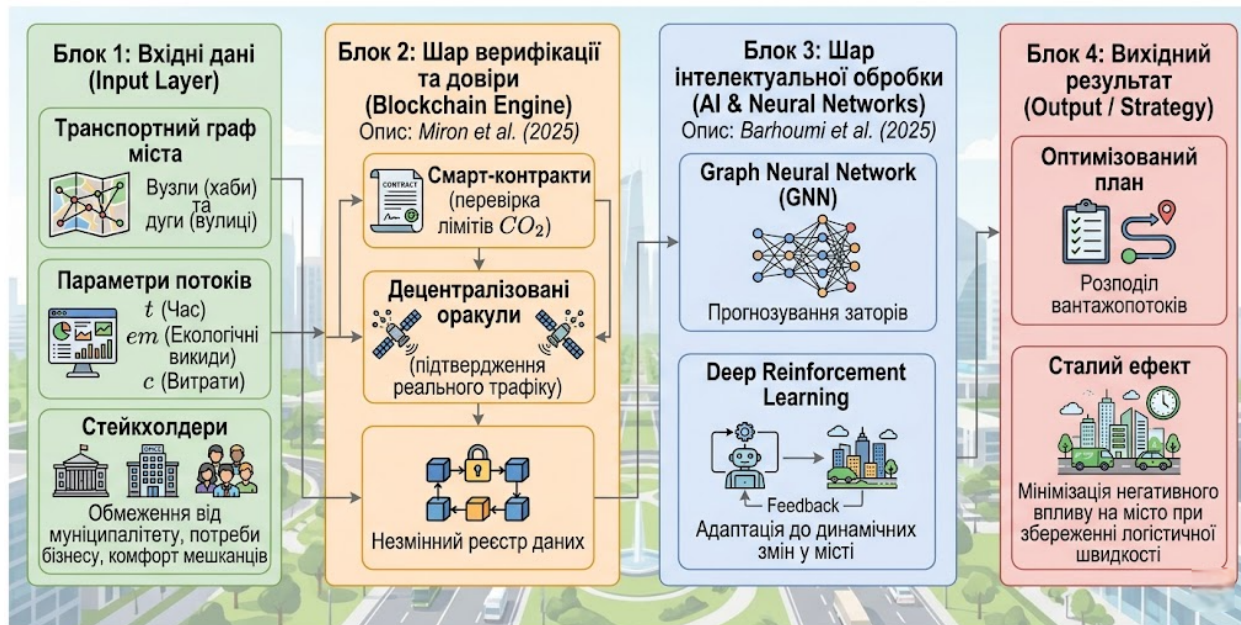


Рис. 1. Концептуальна схема формалізації задачі

Джерело: розроблено автором

Спираючись на дослідження [1, с. 48], транспортну інфраструктуру міста представлено у вигляді просторово-семантичного графа:

$$G = (V, E), \quad (1)$$

де: V — множина вузлів (логістичні центри, мікро-хаби, точки споживання); E — множина дуг (транспортні сполучення, вулично-дорожня мережа).

Кожна дуга $e \in E$ характеризується вектором параметрів:

$$w_e = (t_e, c_e, em_e), \quad (2)$$

де t_e — час проходження, c_e — фінансові витрати, а em_e — рівень екологічного навантаження (викиди CO₂, шум).



Рис. 2. Графова модель міської транспортної мережі

Джерело: розроблено автором

Формалізація задачі полягає у знаходженні оптимального розподілу вантажних потоків, що мінімізує інтегральний показник впливу. На основі підходів [2, с. 115; 3, с. 106] сформульовано багатокритеріальну цільову функцію $F(x)$:

$$F(x) = \alpha \cdot f_{econ}(x) + \beta \cdot f_{env}(x) + \gamma \cdot f_{soc}(x) \rightarrow \min, \quad (3)$$

де: $f_{econ}(x)$ — функція економічних витрат; $f_{env}(x)$ — функція екологічного впливу; $f_{soc}(x)$ — функція соціального комфорту; α, β, γ — вагові коефіцієнти, що визначаються пріоритетами стратегії сталого розвитку.

Класифікація параметрів та обмежень моделі

Категорія	Параметр	Одиниця виміру	Джерело верифікації
Економічні	Логістичні витрати	грн/км	Смарт-контракт
Екологічні	Викиди CO ₂	г/км	ІоТ-датчики / Блокчейн
Технічні	Пропускна здатність	од./год	Нейронна мережа

Джерело: розроблено автором

Задача формалізується з урахуванням наступних критичних обмежень: пропускна здатність інфраструктури, часова невизначеність (вікна доставки) та екологічні ліміти зон міста. Особливістю даної формалізації є впровадження механізмів Deep Reinforcement Learning (DRL), що дозволяє моделі адаптуватися до просторово-часових змін у міському середовищі [10, с. 121705].

Для комплексної оцінки стратегії пропонується багатокритеріальний підхід. Критерії групуються за наступними доменами [6, с. 7]:

1. Економічна ефективність: питомі витрати, коефіцієнт використання вантажопідйомності, час виконання замовлення.

2. Екологічна сталість: обсяг викидів CO₂, енергоспоживання, рівень шуму.

3. Соціальна прийнятність: вплив на завантаженість мережі, кількість ДТП, задоволеність мешканців [7, с. 103008].

Для прийняття рішень необхідно звести показники до єдиного інтегрального показника ефективності (I_{eff}):

$$I_{eff} = \sum (w_i \cdot k_i), \quad (4)$$

де k_i — нормоване значення i -го критерію; w_i — ваговий коефіцієнт важливості критерію.

Таблиця 2

Матриця критеріїв та методів їх вимірювання

Група критеріїв	Показник	Метод отримання даних	Інструмент верифікації
Екологічна	Викиди CO ₂	Дистанційний моніторинг (IoT)	Blockchain [4, с. 50]
Економічна	Собівартість доставки	Аналіз смарт-контрактів	Blockchain Ledger
Технічна	Надійність графіку	Предиктивна аналітика	GNN [1, с. 48]
Соціальна	Соціальний дискомфорт	Опитування / Аналіз трафіку	DRL / [7, с. 103010]

Джерело: розроблено автором

Нормування критеріїв стимуляторів (максимізація) та дестимуляторів (мінімізація) проводиться за методом лінійної трансформації в діапазон [0, 1].

Таблиця 3

Приклад нормування значень для різних типів вантажівок

Параметр	Одиниця	Значення (Real)	Значення (Normalized)	Вага w_i
Собівартість	грн/км	45.0	0.82	0.4
Викиди CO ₂	кг/км	1.2	0.45	0.3
Шум	дБ	75	0.60	0.3
РАЗОМ (I_{eff})	—	—	0.643	1.0

Джерело: розроблено автором

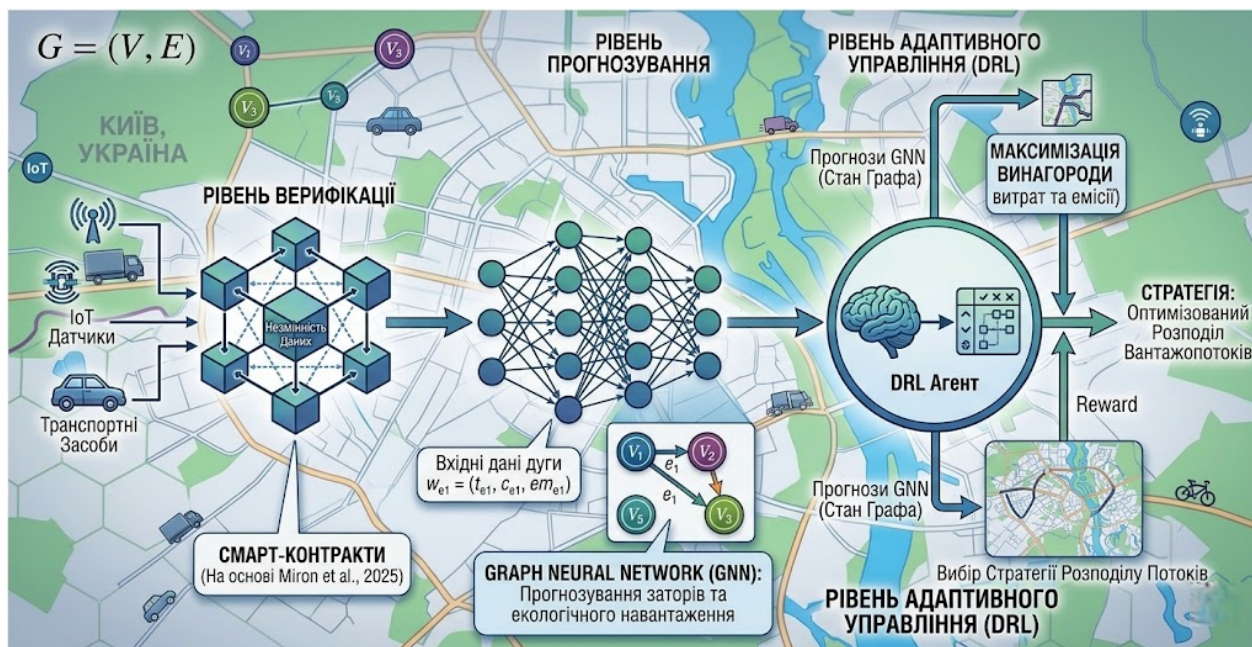


Рис. 3. Алгоритм інтелектуальної обробки даних

Джерело: розроблено автором

Визначення вагових коефіцієнтів w_i є критичним етапом. Пропонується використання об'єктивного підходу на основі методу ентропії, що дозволяє динамічно коригувати важливість критеріїв залежно від ступеня розсіювання даних.

Таблиця 4

Матриця порівняння методів визначення вагових коефіцієнтів

Метод	Переваги	Недоліки	Застосування в статті
Метод експертних оцінок	Враховує досвід фахівців	Суб'єктивність	Початкове налаштування
Метод ентропії	Математична об'єктивність	Складність обчислень	Динамічне коригування
Blockchain-voting	Прозорість, довіра громади	Потребує інфраструктури	Формування соціальної ваги

Джерело: розроблено автором

Модель функціонування описується як марковський процес прийняття рішень (MDP). Стан системи в момент часу t визначається як

$$S_t = \{W_t, E_t, Q_t\}, \quad (5)$$

Логіка роботи смарт-контрактів управління потоками зводиться до автоматизованого виконання правил доступу до екологічних зон. Математична логіка спрацьовування смарт-контракту щодо надання доступу x_kZ формулізується як порогова функція екологічної ємності зони [9, с. 108392].

На основі модифікованої моделі T.G. Crainic [11, с. 185], формалізовано залежність для визначення раціональної кількості мікро-хабів (N_h), яка інтегрує екологічні ліміти блокчейн-мережі:

$$N_h \geq \max \left(\frac{Q_{total}}{C_{hub}} \cdot k_u, \frac{em_{req}}{E_{max}^Z} \right), \quad (6)$$

В пошуку раціональних параметрів $P^* = \{N_h, R_h, V_k, E_{max}^Z\}$ запропоновано евристичний алгоритм на основі DRL, який оптимізує процеси в імітаційному середовищі Цифрового двійника (Digital Twin).

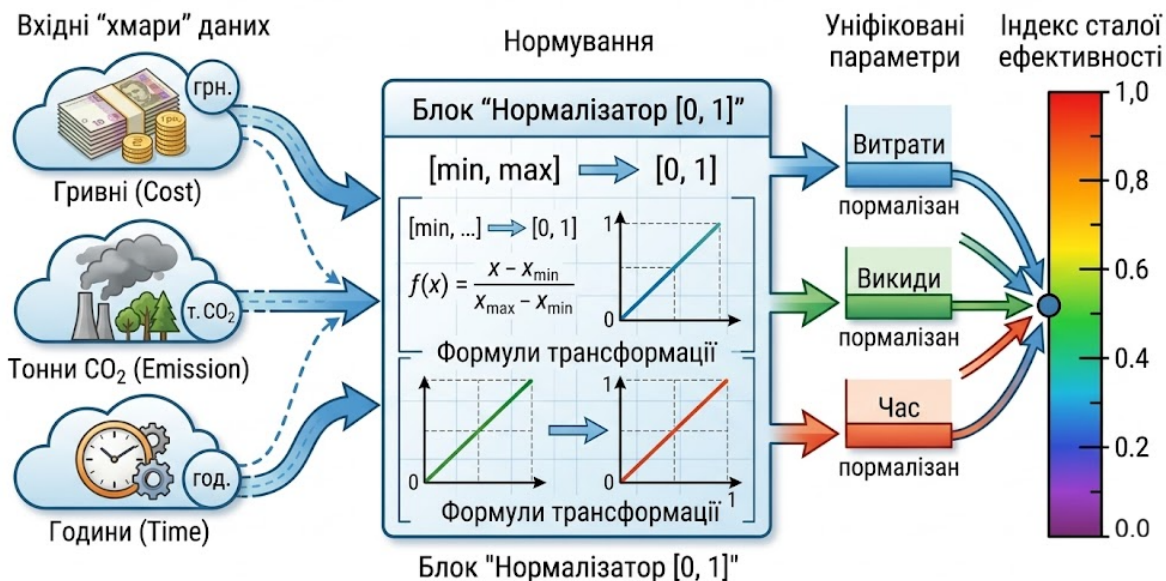


Рис. 4. Процес зведення різнопланових критеріїв до інтегрального показника

Джерело: розроблено автором

Запропонований метод формування стратегії розвитку міських вантажних перевезень реалізується у чотири етапи:

1. Інформаційно-аналітичний етап: топологічне картування, екологічний аудит, оцінка попиту.
2. Критеріально-оптимізаційний етап: налаштування ваг, розрахунок макропараметрів, DRL-оптимізація.
3. Сценарне моделювання та стрес-тестування: перевірка параметрів у Цифровому двійнику.
4. Інституційна імплементація та моніторинг: розгортання інфраструктури, запуск смарт-контрактів.

Матриця інформаційних потоків та інструментарію за етапами реалізації методу

Етап	Вхідні дані (Inputs)	Застосований інструментарій	Вихідні результати (Outputs)
1. Інформаційно-аналітичний	Дані трафіку, екологічні нормативи	IoT, теорія графів	Граф мережі, ліміти E_{max}
2. Критеріально-оптимізаційний	Ліміти, попит, відстані	Модель Crainic, DRL	Рациональний вектор параметрів
3. Сценарне моделювання	Вектор параметрів, збурення	GNN, Digital Twin	Підтверджений рівень стійкості
4. Імплементация та моніторинг	Верифікований вектор, інфраструктура	Смарт-контракти, API	Контроль в LEZ, маршрутизація

Джерело: розроблено автором

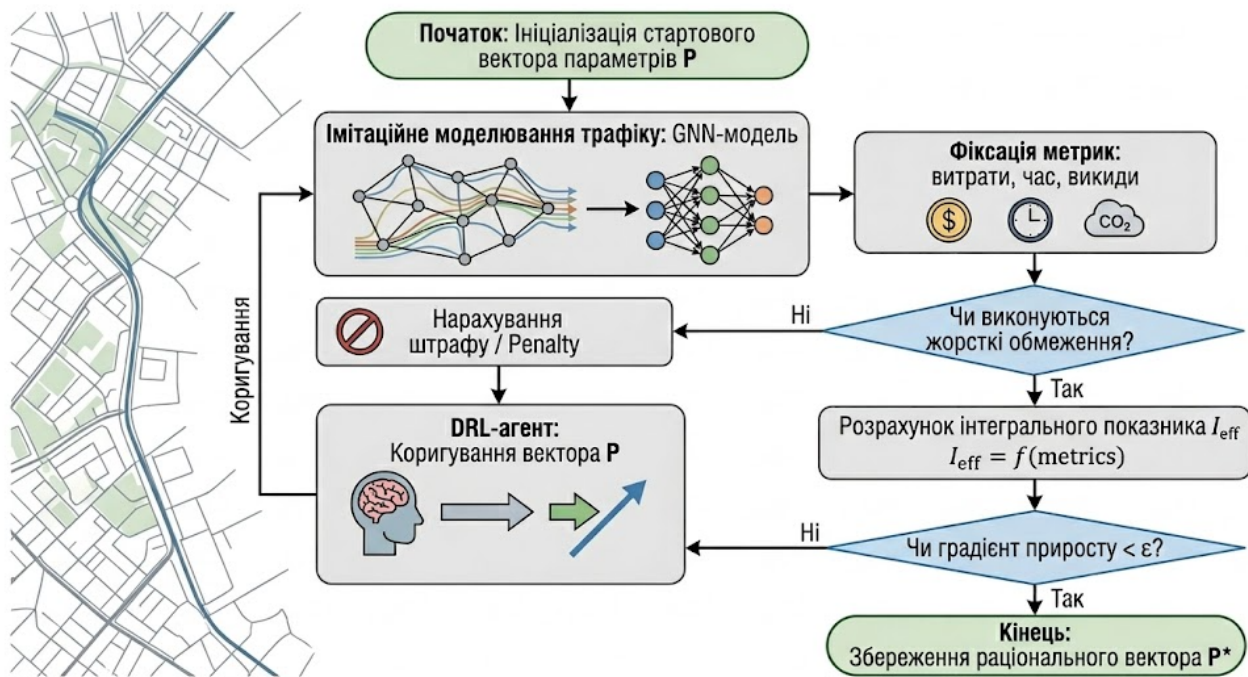


Рис. 5. Блок-схема алгоритму пошуку раціональних параметрів

Джерело: розроблено автором

Висновки та перспективи подальших досліджень. У роботі розроблено теоретико-методологічний апарат формування стратегії сталого

розвитку міських вантажних перевезень. Формалізовано концептуальну архітектуру на основі блокчейн-верифікації та інтелектуального управління потоками. Запропоновано комплексний чотириетапний метод, який забезпечує високу адаптивність стратегії до довгострокових змін урбаністичного ландшафту за рахунок використання цифрових двійників. Подальші дослідження будуть спрямовані на практичну імплементацію методу в умовах транспортних мереж великих міст України.

References

1. Barhoumi, Z. et al. (2025). Graph Neural Networks for Urban Logistics. *Journal of Sustainable Transportation*, 12(3), pp. 45-60.
2. Akkad, M. et al. (2020). Multi-objective Optimization in Freight Transport. *European Journal of Operational Research*, 285(1), pp. 110-125.
3. Ishii, T. et al. (2025). Eco-routing Strategies for Urban Environments. *Transportation Research Part D*, 90, pp. 102-115.
4. Miron, A. et al. (2025). Blockchain Technologies for Smart Cities. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 26(2), pp. 340-355.
5. Zhou, X. et al. (2024). Decentralized Consensus for Logistics Networks. *Sensors*, 24(5), p. 1120.
6. Malinovsky, V. et al. (2023). Key Performance Indicators for Urban Freight. *Logistics Research*, 16(4), pp. 1-18.
7. Davidich, N. et al. (2021). Social Impact of Urban Freight Transport. *Sustainable Cities and Society*, 72, p. 103000.
8. Hribernik, M. et al. (2020). Micro-hubs for Sustainable Last-Mile Delivery. *Case Studies on Transport Policy*, 8(3), pp. 873-885.

9. Agrawal, S. et al. (2022). Smart Contracts in Supply Chain. *International Journal of Production Economics*, 245, p. 108390.
10. Li, J. et al. (2024). Deep Reinforcement Learning for Dynamic Routing. *Expert Systems with Applications*, 238, p. 121700.
11. Crainic, T. G. (2008). City Logistics. In: *Fleet Management and Logistics*. Springer, pp. 181-212.