

УДК 656.07:519.2:504

DOI: <https://doi.org/10.53920/ITS-2025-1;2-5>

Роман Володимирович ЗІНЬКО,

доктор технічних наук, професор,
Національний університет «Львівська політехніка»

ORCID ID: [0000-0002-3275-8188](https://orcid.org/0000-0002-3275-8188)

МОДЕЛЮВАННЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕГАПОЛІСІВ НА СТАН ДОВКІЛЛЯ

У роботі розглянуто методологію математичного моделювання впливу транспортної системи великих міст на екологічний стан урбанізованого середовища. Актуальність дослідження обумовлена потребою інтеграції екологічної безпеки в процеси міського планування, у контексті реалізації «Зеленої трансформації» України та європейського зеленого курсу. Запропоновано концепцію створення математичної моделі екологічного моніторингу, яка може бути інтегрована до складу інтелектуальної транспортної системи (ITS).

У якості базового інструменту моделювання застосовано клітинкові автомати, що дозволяє з високою деталізацією змодельовати динаміку транспортних потоків та їх вплив на довкілля в режимі реального часу. Застосовано також метод почленної диз'юнкції для структуризації знань про джерела та типи екологічного забруднення на ключових елементах транспортної інфраструктури — перехрестях і парковках. Виділено основні типи забруднення: теплове, шумове, електромагнітне та хімічне (токсичні викиди). На основі множинного моделювання побудовано парадигматичну таблицю локалізації знань, яка дозволяє ефективно обирати входні параметри для формування екологічної карти вулично-дорожньої мережі.

Ключові слова: структуризація знань, екологічний моніторинг транспортної системи, математична модель, клітинкові автомати.

Roman ZINKO,

Doctor of technical sciences, professor
Lviv Polytechnic National University

SIMULATION-BASED ASSESSMENT OF URBAN TRANSPORT INFRASTRUCTURE'S ENVIRONMENTAL IMPACT

This paper presents a methodological approach to mathematical modeling of the impact of urban transportation systems on the environmental condition

of metropolitan areas. The relevance of the study stems from the urgent need to integrate environmental safety into urban planning processes, particularly within the framework of Ukraine's "Green Transformation" and the European Green Deal. A conceptual framework for building a mathematical model for environmental monitoring is proposed, which can be integrated into modern Intelligent Transportation Systems (ITS).

Cellular automata are employed as the core modeling tool, allowing for detailed simulation of traffic flow dynamics and their environmental effects in real time. The method of term-by-term disjunction is applied to structure domain-specific knowledge on pollution types and their sources at key transportation infrastructure elements such as intersections and parking zones. The model accounts for various forms of pollution including thermal, noise, electromagnetic, and chemical emissions (toxic exhaust gases). Based on multiple simulations, a paradigmatic knowledge localization table is developed, facilitating the selection of relevant input parameters for generating an environmental impact map of the urban road network.

The practical value of the proposed approach lies in its ability to visualize and forecast changes in environmental conditions under different traffic organization scenarios (e.g., implementation of bypass roads, reversible lanes, road closures). The results can contribute to enhanced environmental safety, optimization of urban traffic, and development of strategies for sustainable urban transport infrastructure.

Keywords: knowledge structuring, ecological monitoring of transport systems, mathematical model, cellular automata.

Постановка проблеми. Україна зацікавлена у впровадженні Зеленої трансформації з метою інтеграції в європейське середовище. Відповідно проводиться державна політика щодо до модернізації не тільки галузей економіки, але і доквілля з урахуванням цілей сталого розвитку та Зеленого курсу Європи [1-2]. В Європі проводиться політика зменшення шкідливих викидів від транспортних засобів [3-5]. Розробляються документи щодо формування міської мобільності з урахуванням Зеленого курсу. Він враховує глибокий аналіз майбутніх тенденцій, викликів і новаторських рішень [6]. Інститут європейської екологічної політики (IEEP) за підтримки Фонду чистого повітря підготував новий звіт «Зони з низьким рівнем викидів: вирішення соціальних проблем політики чистого повітря в містах ЄС» [7]. У звіті IEEP обговорюються ключові питання соціальної прийнятності зон із низьким і нульовим рівнем викидів (LEZ і ZEZ), спираючись на досвід п'яти міст ЄС – Стокгольма, Мілана, Брюсселя, Софії та Варшави.

Актуальність проблеми підтверджується державними законами стосовно охорони природного середовища і атмосферного повітря. Забезпечення безпеки руху, екологічної безпеки, сталого розвитку населених пунктів потребує вдосконалення транспортної та екологічної інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідники визначають взаємозалежність між окремими викидами і параметрами транспортного потоку (структури, віку транспортних засобів та інтенсивності руху) [6-8], з врахуванням піків завантаження потоку [7], розглядають способи зменшення забруднення вулиць міста [9]. Окремо досліджуються способи зменшення екологічного забруднення на пішохідних доріжках при різних сценаріях трафіку [10-11], а також вплив шуму спричиненого транспортним потоком на довкілля вулиці і можливість пониження його рівня шляхом підбору параметрів елементів забудови вулиці [12]. Актуальними є дослідження стосовно впорядкування транспортних потоків за допомогою Intelligent Transportation Systems [13-16], а також визначення емісії забруднення від транспортних потоків в масштабі цілої країни [13].

Мета статті – розглянути математичну модель оцінки екологічного стану транспортної системи міста на основі клітинкових автоматів та продемонструвати її ефективність для моніторингу і прогнозування впливу транспортної інфраструктури на довкілля.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Для визначення основних вхідних параметрів транспортної системи необхідно конкретизувати коло параметрів і вибрати ті, що будуть використовуватися для моделювання екологічного стану ТС.

Складовою частиною ІТС може бути модуль моделювання екологічного стану ТС. Такий модуль з одного боку може бути основою для моніторингу забруднення, з іншого боку – забезпечувати можливість моделювати поточний стан на основі вхідних параметрів, що змінюються в реальному часі.

Модуль моделювання екологічного стану ТС може функціонувати на основі методу почленної диз'юнкції. Суть методу почленної диз'юнкції полягає в тому, що вибірку елементів, які мають спільні ознаки і властивості, переформовують на основі заданого критерія.

Метод почленної диз'юнкції використовується для формування характеристик і властивостей ТС [17]. Це здійснюється на основі початкової інформації про ТС і особливості функціонування. Варто було б спробувати використовувати метод почленної диз'юнкції і для формування структури ТС на основі типових елементів, з яких зазвичай складається ТС.

Нагадаємо, що диз'юнкцією двох висловлювань називається таке нове висловлювання, яке істинне тоді і тільки тоді, коли істинно хоча б одне з цих висловлювань. Отже, з вибірки елементів, які можуть мати спільні ознаки і властивості, а в цілому об'єднуватися між собою за сукупністю ознак можна вибрати ті елементи, що мають спільну властивість або критерій.

Формалізуємо вищесказане. Розглянемо граф структури знань про екологічне забруднення на перехрестях і парковках як елементах ТС. Загальна множина таких знань містить підмножини, що структурують загальні знання за ознаками. Позначимо r_1 — перехрестя; r_2 — парковка, вони складатимуть множину, яку назвемо «Сукупність ознак» $R = \{r_i\}$, де $i = 1, 2$. Підмножина «Ознаки» $U = \{u_j\}$ має 3 елементи — значення ознак, тобто $j = 1, \dots, 3$, де u_1 — повітря; u_2 — ґрунт; u_3 — вода. Підмножина «Характеристики ознак» $L = \{l_k\}$, яка має 4 елементи — значення характеристик ознак, тобто $k = 1, \dots, 4$, де l_1 — теплове забруднення; l_2 — вібраційне (шумове) забруднення; l_3 — електромагнітне забруднення; l_4 — компоненти забруднення в середовищі. Введемо тепер множину $Q = \{q_s\}$ областей знань q_s , де індекс $s = 1, \dots, 11$.

Таким чином, можна побудувати парадигматичну таблицю, що відображає зв'язок між областю локалізації знань q_s і предметними змінними r_i, u_j, l_k (табл. 1).

Таблиця 1. Зв'язок між областю локалізації знань q_s і предметними змінними r_i, u_j, l_k .

Сукупність ознак	Ознаки	Характеристики ознаки	Області локалізації знань
r_1 (перехрестя)	u_1 (повітря)	l_1 (теплове забруднення)	$q_1 = r_1 u_1 l_1$
r_1 (перехрестя)	u_1 (повітря)	l_2 (шумове забруднення)	$q_2 = r_1 u_1 l_2$
r_1 (перехрестя)	u_1 (повітря)	l_3 (електромагнітне забруднення)	$q_3 = r_1 u_1 l_3$
r_1 (перехрестя)	u_1 (повітря)	l_4 (компоненти забруднення в середовищі)	$q_4 = r_1 u_1 l_4$
r_1 (перехрестя)	u_2 (ґрунт)	l_2 (шумове забруднення)	$q_5 = r_1 u_2 l_2$
r_1 (перехрестя)	u_2 (ґрунт)	l_4 (компоненти забруднення в середовищі)	$q_6 = r_1 u_2 l_4$
r_1 (перехрестя)	u_3 (вода)	l_4 (компоненти забруднення в середовищі)	$q_7 = r_1 u_3 l_4$

Закінчення таблиці 1

Сукупність ознак	Ознаки	Характеристики ознаки	Області локалізації знань
r_2 (парковка)	u_1 (повітря)	l_1 (теплове забруднення)	$q_8 = r_2 u_1 l_1$
r_2 (парковка)	u_1 (повітря)	l_2 (шумове забруднення)	$q_9 = r_2 u_1 l_2$
r_2 (парковка)	u_1 (повітря)	l_3 (електромагнітне забруднення)	$q_{10} = r_2 u_1 l_3$
r_2 (парковка)	u_1 (повітря)	l_4 (компоненти забруднення в середовищі)	$q_{11} = r_2 u_1 l_4$

Якщо виконаємо операцію почленної диз'юнкції для можливо більшого числа споріднених рівностей [10], то отримаємо локальну область знань. Такі області можуть включати більш ніж одну обчислювану обмежену кількість ознак і предметних областей досліджень, а саме:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_1 u_1 (l_1 \vee l_2 \vee l_3 \vee l_4) = q_1 \vee q_2 \vee q_3 \vee q_4, \\ r_1 u_1 (l_2 \vee l_4) = q_5 \vee q_6, \\ r_1 u_3 l_4 = q_7, \\ r_2 u_1 (l_1 \vee l_2 \vee l_3 \vee l_4) = q_8 \vee q_9 \vee q_{10} \vee q_{11} \end{array} \right. \quad (1)$$

Функція переходу від предметної області знань q_k до локальної області досліджень експерта m_t (індекс приймає значення $t = 1, 2$):

$$\left\{ \begin{array}{l} q_1 \vee q_2 \vee q_3 \vee q_4 \vee q_8 \vee q_9 \vee q_{10} \vee q_{11} = m_1, \\ q_5 \vee q_6 \vee q_7 = m_2. \end{array} \right. \quad (2)$$

Локальна область конкретного дослідження експерта не має чіткого алгоритму формулювання. Вона залежить від суб'єктивного підходу і загальних тенденцій розвитку і видозміни знань в даній галузі.

Враховуючи залежність (1) предметних областей знань q_s від предметних змінних r_i, u_j, l_k та зв'язок (2) між предметними областями знань q_s та локальними областями досліджень експерта m_t , ми можемо представити залежності локальних областей m_t від предметних змінних r_i, u_j, l_k у вигляді:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_1 = r_1 u_1 (l_1 \vee l_2 \vee l_3 \vee l_4) \vee r_2 u_1 (l_1 \vee l_2 \vee l_3 \vee l_4), \\ m_2 = r_1 u_1 (l_2 \vee l_4) \vee r_1 u_3 l_4. \end{array} \right\} \quad (3)$$

Тоді предикат $P(r, l, u, m)$ або система взаємозв'язків локальних областей досліджень експерта m та предметних змінних r, l, u має наступний вигляд:

$$P(r, l, u, m) = m_1 r_1 u_1 (l_1 \vee l_2 \vee l_3 \vee l_4) \vee m_1 r_2 u_1 (l_1 \vee l_2 \vee l_3 \vee l_4) \vee m_2 r_1 u_2 (l_2 \vee l_4) \vee m_2 r_1 u_3 l_4 \quad (4)$$

Предикат P можна графічно зобразити у вигляді логічної мережі (рис. 1).

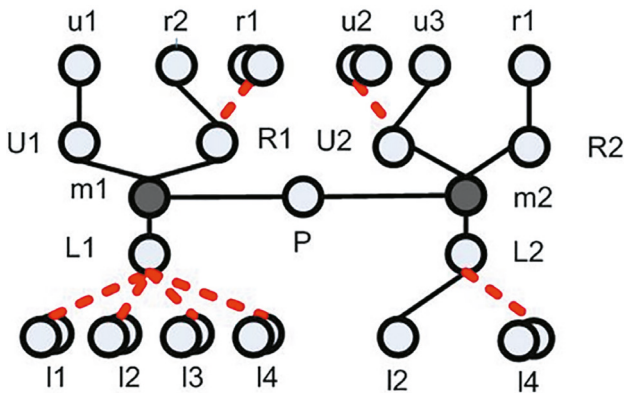


Рис. 1. Предикат P відношень значень змінної m_t локальних областей досліджень експерта та предметних змінних r_i, u_j, l_k для предметних областей знань q_s .

Предикат P описує локальні області досліджень, де значна увага звертається на дослідження в двох напрямках m_1 і m_2 . Напрямок m_1 – екологічний стан на перехрестях і парковках Інший напрям m_2 – забруднення води і ґрунту відпрацьованими частинками елементів транспортних засобів. При цьому дослідження викидів відпрацьованих частинок l_4 є домінуючими.

З рис. 1 видно, що більш розгалуженими є дослідження в напрямку m_1 за впливом компонент $l_1 - l_4$ на повітря. Відповідно, ці дослідження і потрібно брати для формування основних вхідних параметрів при моделюванні екологічного стану на перехресті.

Моделювання екологічного стану доцільно здійснювати за допомогою ефективних математичних моделей транспортних потоків, здатних адекватно прогнозувати стан ТС. Для вирішення цієї задачі доцільно використовувати новий клас моделей транспортних потоків, що базується на мікроскопічному підході – застосування клітинкових автоматів [18-21]. Моделювання проводилося в середовищі MATLAB, що дає можливість більш детально представити взаємодію автомобілів в транспортному потоці. Особливістю роботи програми є використання генератора випадкових чисел для появи нового клітинкового автомата. Тому після багаторазового моделювання руху на вибраній ділянці дороги можна визначити статистичну картину завантаженості окремих її частин.

Оцінка загального впливу автотранспорту на мезоклімат урбанізованих територій [7, 10, 11] визначається:

$$Q = Q_s \cdot G \cdot (1 - \eta)S, \quad (5)$$

де Q – тепловиділення від автотранспорту;

Q_s – середня теплота згорання палива, МДж/м³;

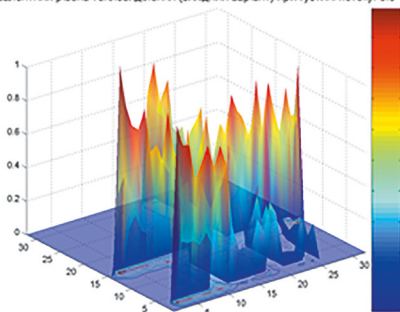
G – витрата палива, т/год;

η – коефіцієнт корисної дії;

S – нормована інтенсивність транспортного потоку, авт/год.

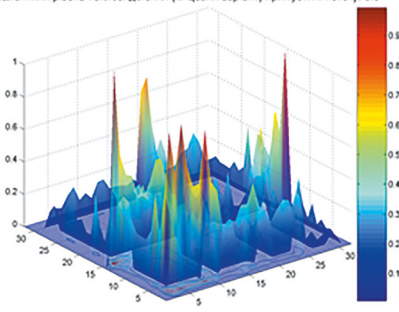
На рис. 2 показано еквівалентний рівень тепловиділення, розрахований за формулою (5).

Еквівалентний рівень тепловиділення (вихідний варіант) при густині потоку: 0.9



а)

Еквівалентний рівень тепловиділення (кінцевий варіант) при густині потоку: 0.9



б)

Рис. 2. Еквівалентний рівень тепловиділення, спричиненого роботою двигунів автомобілів на перехресті:
а) до вдосконалення схеми дорожнього руху;
б) після введення об'їзної дороги

При рівномірному русі на прямій передачі по прямолінійній ділянці дороги рівень шуму автомобіля може бути описаний рівнянням:

$$L = 10 \cdot \lg N + 13,3 \cdot \lg V + 8,4 \cdot \lg \rho + 7, \quad (6)$$

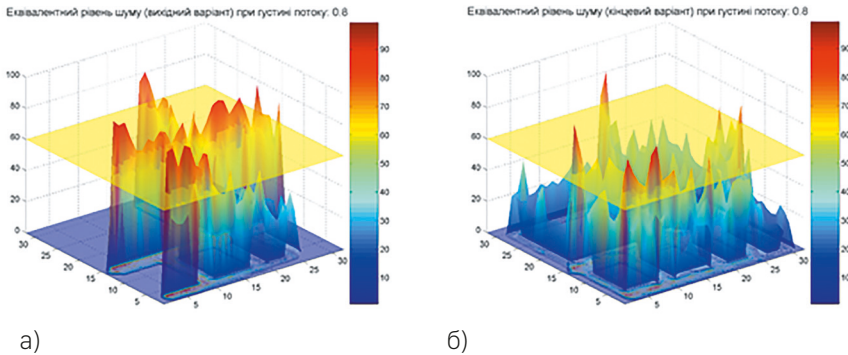
де L – рівень звуку, дБА;

N – загальне кількість транспортних одиниць в двох напрямках руху за 1 годину, од;

V – швидкість руху транспортного потоку, м/с;

ρ – частка вантажних і громадських транспортних засобів в загальному потоці, %.

Нижче, на рис. 3, показано еквівалентний рівень шуму, розрахований за формулою (6).



**Рис. 3. Еквівалентний рівень шуму, створюваного автомобілями на перехресті:
а) до вдосконалення схеми дорожнього руху;
б) після введення об'їзної дороги**

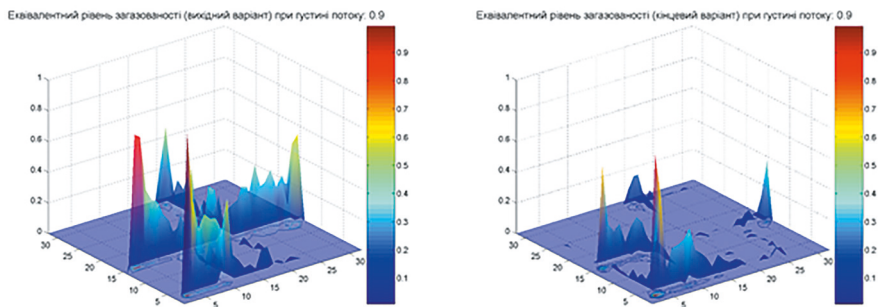
Розрахункове значення токсичних компонентів відпрацьованих газів на досліджуваній ділянці:

$$M_i^p = \sum_{j=1}^k M_{ij}^{pn} + \sum_{j=1}^l M_{ij}^{ln} + \sum_{j=1}^r M_{ij}^b, \quad (7)$$

де $\sum_{j=1}^k M_{ij}^{pn}$, $\sum_{j=1}^l M_{ij}^{ln}$, $\sum_{j=1}^r M_{ij}^b$ – відповідно масові викиди відпрацьованих газів на регульованих, нерегульованих перехрестях і вулицях між перехрестями;

k, l, r – відповідно кількість регульованих, нерегульованих перехресть і вулиці між перехрестями.

На рис. 4 показано еквівалентний рівень загазованості, розрахований за формулою (7).



а)

б)

Рис. 4. Еквівалентний рівень загазованості, викликаній роботою двигунів автомобілів на перехресті:

а) до вдосконалення схеми дорожнього руху;

б) після введення об'їзної дороги.

Висновки та пропозиції. Представлена методика структуризації знань в галузі дослідження екологічного стану ТС дозволяє впорядковувати і унаочнювати взаємозв'язки між характерними ознаками мережі, а також вибирати основні параметри ТС, які можуть бути досліджені шляхом математичного моделювання.

У випадку створення інтелектуальної транспортної системи (ITS) модуль моделювання екологічного стану ТС може функціонувати на основі методу почленної диз'юнкції. Метод почленної диз'юнкції використовується для формування характеристик і властивостей ТС. Це здійснюється на основі початкової інформації про ТС і особливості функціонування. Доцільно було б використовувати метод почленної диз'юнкції і для формування структури ТС на основі типових елементів, з яких зазвичай складається ТС.

Запропоновано використовувати новий клас моделей транспортних потоків, що базується на мікроскопічному підході, тобто застосуванні клітинкових автоматів для моделювання екологічного стану вулично-дорожньої мережі великих міст. Такі моделі можуть бути основою для екологічного моніторингу ТС. Для прикладу показано зміну екологічного стану перехрестя вулично-дорожньої мережі за результатами введення об'їзної дороги.

Здійснивши багаторазове моделювання руху транспорту на базі використання клітинкових автоматів можна формувати екологічні карти ТС. При чому, робити це з урахуванням нетипових ситуацій: звуження, блокування дороги, використання додаткових шляхів, реверсування руху, тощо.

© **Зінько Р.В., 2025**

ЛІТЕРАТУРА

1. Сало Я. В. «Зелена» логістика в Україні: проблеми та перспективи // *Економіка та суспільство*. 2023. Вип. 47. С. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-58>.
2. Політика ЄС щодо зеленої економіки та інновацій : підручник / Ю. В. Орловська, В. С. Чала, А. В. Глущенко ; за ред. Ю. В. Орловської. Дніпро : ПДАБА, 2023. 193 с.
3. Викиди CO₂ для нових автомобілів і фургонів. URL: <https://greentransform.org.ua/vykydy-co-vid-novyh-avtomobiliv-i-furgoniv-v-yes-znyzylsya-u-2023-rotsi/> (дата звернення: 10.06.2025).
4. ЄС ввів суворіші стандарти викидів для великовантажних транспортних засобів. URL: <https://greentransform.org.ua/yes-vviv-suvorishi-standarty-vykydiv-co2-dlya-velykovantazhnyh-transportnyh-zasobiv/> (дата звернення: 10.06.2025).
5. Euro 7: Council adopts new rules on emission limits for cars, vans and trucks. URL: <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for-cars-vans-and-trucks/> (дата звернення: 10.06.2025).
6. Майбутнє міської мобільності. URL: <https://greentransform.org.ua/majbutnye-miskoyi-mobilnosti-spetsialnyj-zvit-z-klyuchovymy-insajtamyi/> (дата звернення: 10.06.2025).
7. Як створити зони з низьким рівнем викидів. URL: <https://greentransform.org.ua/yak-stvority-zonu-z-nyzkym-i-nulovym-rivnem-vykydiv-shhob-pokrashhyty-yakist-povitrya-u-misti/> (дата звернення: 10.06.2025).
8. Лежнева О. І., Желновач Г. М., Очеретенко С. В. Екологічні аспекти транспортної системи міста : монографія. Харків : Зебра, 2017. 180 с.
9. Catalano M., Galatioto F., Bell M., Namdeo A., Bergantino A. Improving the prediction of air pollution peak episodes generated by urban transport networks // *Environmental Science & Policy*. 2016. Vol. 60. P. 69–83.
10. Бакуліч О. О., Гребельник М. М., Самойленко Є. С. Управління екологічною безпекою мегаполісу // *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2022. Вип. 1 (51). С. 20–26. DOI: 10.33744/2308-6645-2022-1-51-020-027.
11. Пляцук Л. Д., Васькін Р. А., Васькіна І. В. Моделювання поширення викидів від автотранспорту у селітебних територіях міст // *Екологічна безпека*. 2011. № 2 (12). С. 36–38.

12. Sternad M., Knez M., Rosi B. Improving city transport with the objective to reduce CO₂ emissions // *Transport Problems*. 2010. Vol. 5, No. 4. P. 95–103.
13. Gallagher J. A Modelling exercise to examine variations of NO_x concentrations on adjacent footpaths in a street canyon: The importance of accounting for wind conditions and fleet composition // *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 550. P. 1065–1074.
14. Hincu G. Computer assisted evaluation of traffic noise level // *Technical Acoustics*. 2003. No. 19. P. 1–6.
15. Śładkowski A., Pamuła W. Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2016.
16. Rakhmangulov A., Śładkowski A. Design of an ITS for Industrial Enterprises // *Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives*. 2016.
17. Wasiak M., Klodawski M., Lewczuk K. et al. Chosen aspects of simulation model to designing pro-ecological transport system // *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2014. Vol. 21, No. 4. P. 525–532.
18. Антоненко Ю. М., Шахновський А. М. Моделювання транспортних потоків для оцінки забруднення повітря в умовах міста // *Комп'ютерне моделювання природоохоронних процесів*. 2009. № 2. С. 125–127.
19. Зінько Р. В. Морфологічне середовище для дослідження технічних систем : монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2014. 386 с.
20. Маковейчук О. М., Зінько Р. В. Принципи організації анізотропного середовища для клітинкових автоматів // *Науковий вісник НЛТУУ*. 2007. Вип. 17.5. С. 210–213.
21. Зінько Р. В., Маковейчук О. М. Принципи формування інтелектуальної транспортної системи // *Науковий вісник НЛТУУ*. 2007. Вип. 17.6. С. 280–285.
22. Петровський А., Голощапов С. Клітинкові автомати в моделюванні роботи перехрестка // *Науковий вісник ХДМІ*. 2010. № 1 (2). С. 78–83.
23. Маковейчук О. М. Моделювання транспортних потоків методами клітинкових автоматів // *Науковий вісник НЛТУУ*. 2007. Вип. 17.4. С. 269–271.

REFERENCES

1. Salo Ya.V. (2023). "Zelena" lohistyka v Ukraini: problemy ta perspektyvy ["Green" logistics in Ukraine: problems and prospects]. *Ekonomika ta suspilstvo – Economy and Society*, 47, 1–6. <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2023-47-58> [in Ukrainian].
2. Orlovska Yu.V., Chala V.S., Hlushchenko A.V. (2023). Polityka Yes shchodo zelenoi ekonomiky ta innovatsii [EU policy on green economy and innovations]. Dnipro: PDABA. 193 p. [in Ukrainian].
3. Vykydy CO₂ dlia novykh avtomobiliv i furhoniv [CO₂ emissions for new cars and vans]. Retrieved from <https://greentransform.org.ua/vykydy-co-vid-novyh-avtomobiliv-i-furgoniv-v-yes-znyzylsya-u-2023-rotsi/> [in Ukrainian].

4. Yes vviv suvorishi standarty vykydiv dlia velykovantazhnykh transportnykh zasobiv [EU introduced stricter emission standards for heavy-duty vehicles]. Retrieved from <https://greentransform.org.ua/yes-vviv-suvorishi-standarty-vykydiv-co2-dlya-velykovantazhnykh-transportnykh-zasobiv/> [in Ukrainian].
5. Euro 7: Council adopts new rules on emission limits for cars, vans and trucks. Retrieved from <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for-cars-vans-and-trucks/>.
6. Maibutnie miskoi mobilnosti [The future of urban mobility]. Retrieved from <https://greentransform.org.ua/majbutnye-miskoyi-mobilnosti-spetsialnyj-zvit-z-klyuchovymy-insajtamy/> [in Ukrainian].
7. Yak stvoryty zonu z nyzkym rivnem vykydiv [How to create low-emission zones]. Retrieved from <https://greentransform.org.ua/yak-stvoryty-zonu-z-nyzkym-i-nulovym-rivnem-vykydiv-shhob-pokrashhyty-yakist-povityrya-u-misti/> [in Ukrainian].
8. Lezhneva O.I., Zhelnovach H.M., Ocheretenko S.V. (2017). Ekolohichni aspekty transportnoi systemy mista [Ecological aspects of urban transport system]. Kharkiv: Zebra. 180 p. [in Ukrainian].
9. Catalano M., Galatioto F., Bell M., Namdeo A., Bergantino A. (2016). Improving the prediction of air pollution peak episodes generated by urban transport networks. *Environmental Science & Policy*, 60, 69–83.
10. Bakulich O.O., Grebelnyk M.M., Samoilenko Ye.S. (2022). Upravlinnia ekolohichnoiu bezpekoiu mehopolisu [Managing the ecological safety of megacities]. *Bulletin of the National Transport University. Series "Technical Sciences"*, 1(51), 20–26. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-020-027> [in Ukrainian].
11. Plyatsuk L.D., Vaskin R.A., Vaskina I.V. (2011). Modeliuvannia poshyrennia vykydiv vid avtotransportu u selitebnykh terytoriiakh mist [Modeling emissions from vehicles in urban areas]. *Ekolohichna bezpeka – Ecological Safety*, 2(12), 36–38. [in Ukrainian].
12. Sternad M., Knez M., Rosi B. (2010). Improving city transport with the objective to reduce CO₂ emissions. *Transport Problems*, 5(4), 95–103.
13. Gallagher J. (2016). A modelling exercise to examine variations of NO_x concentrations on adjacent footpaths in a street canyon: The importance of accounting for wind conditions and fleet composition. *Science of the Total Environment*, 550, 1065–1074.
14. Hincu G. (2003). Computer assisted evaluation of traffic noise level. *Technical Acoustics*, 19, 1–6.
15. Sladkowski A., Pamula W. (2016). Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives. *Studies in Systems, Decision and Control*.
16. Rakhmangulov A., Sladkowski A. (2016). Design of an ITS for Industrial Enterprises. In: *Intelligent Transportation Systems – Problems and Perspectives*.
17. Wasiak M., Klodawski M., Lewczuk K., Jahimowski R., Szczepanski E. (2014). Chosen aspects of simulation model to designing pro-ecological transport system. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 21(4), 525–532.

18. Antonenko Yu.M., Shakhnovskiy A.M. (2009). Modeliuvannia transportnykh potokiv dlia otsinky zabrudnennia povitria v umovakh mista [Modeling of traffic flows for assessing air pollution in urban conditions]. *Komp'uterne modeliuvannia pryrodookhoronnykh protsesiv – Computer Modeling of Environmental Protection Processes*, 2, 125–127 [in Ukrainian].

19. Zinko R.V. (2014). Morfolohichne seredovyshche dlia doslidzhennia tekhnichnykh system [Morphological environment for research of technical systems]. Lviv: Lvivska politekhnika Publishing House. 386 p. [in Ukrainian].

20. Makoveichuk O.M., Zinko R.V. (2007). Prynstypy orhanizatsii anizotropnoho seredovyshcha dlia klitynkovykh avtomativ [Principles of organizing an anisotropic environment for cellular automata]. *Naukovyi visnyk NLTUU – Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 17.5, 210–213 [in Ukrainian].

21. Zinko R.V., Makoveichuk O.M. (2007). Prynstypy formuvannia intelektualnoi transportnoi systemy [Principles of forming an intelligent transport system]. *Naukovyi visnyk NLTUU – Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 17.6, 280–285 [in Ukrainian].

22. Petrovskiy A., Goloshchapov S. (2010). Kletochnye avtomaty v modelirovanii raboty perekrestka [Cellular automata in modeling the operation of intersections]. *Naukovyi visnyk KHDMI*, 1(2), 78–83. [in Russian].

23. Makoveichuk O.M. (2007). Modeliuvannia transportnykh potokiv metodamy klitynkovykh avtomativ [Modeling transport flows by methods of cellular automata]. *Naukovyi visnyk NLTUU – Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*, 17.4, 269–271 [in Ukrainian].

СТАТТЯ НАДІЙШЛА ДО РЕДАКЦІЇ 10.08.2025