

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної роботи бакалавра

на тему: *Оцінка екологічної безпеки міських транспортних систем на основі
моделювання викидів забруднюючих речовин за методикою COPERT*

Виконав:

студент 3 курсу, групи ТТ-23ск

(шифр групи)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Д.М. Шокотько

Керівник: к.т.н., доцент

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

В.О.Сістук

(прізвище та ініціали)

Завідувач кафедри:

д.т.н., професор

(науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

Ю.А. Монастирський

(прізвище та ініціали)

Кривий Ріг – 2026 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ТРАНСПОРТУ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

Рівень вищої освіти: перший (бакалаврський) рівень вищої освіти

Галузь знань: J – «Транспорт та послуги»

Спеціальність: J8 – «Автомобільний транспорт»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри
автомобільного транспорту

_____/_____
”_____” 2026 р.

ЗАВДАННЯ

НА ВИПУСКНУ РОБОТУ СТУДЕНТА

Шокотько Дмитру Максимовичу

- Тема: *Оцінка екологічної безпеки міських транспортних систем на основі моделювання викидів забруднюючих речовин за методикою COPERT*
керівник проекту Сістук В.О., к.т.н., доцент
затверджені наказом університету № в191с від 07.04.2026.
- Строк подання студентом роботи для перевірки на плагіат до 10.06.2026
- Вихідні дані до роботи: Керівництво до програми VISUM, транспортна модель м. Кривий Ріг
- Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Стан екологічної безпеки Кривого Рогу. 2. Методологія дослідження екологічної безпеки. 3. Оцінка екологічної безпеки транспортних систем. 4. Оформлення пояснювальної записки.
- Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Графіки та діаграми по результатам досліджень у вигляді презентації в програмі Microsoft Office Power Point.
- Дата видачі завдання 07.04.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1	Стан екологічної безпеки Кривого Рогу	07.04-12.04	
2	Методологія дослідження екологічної безпеки	12.04 – 04.05	
3	Оцінка екологічної безпеки транспортних систем	04.05 – 10.05	
4	Оформлення пояснювальної записки і презентації	10.05 – 25.05	

Студент

Д.М. Шокотько

Керівник

В.О. Сістук

РЕФЕРАТ

У роботі обґрунтовано інженерно-екологічний підхід до оцінювання просторового розподілу викидів забруднюючих речовин від автотранспорту на прикладі міста Кривий Ріг. Науково доведено ефективність застосування розрахункового комплексу COPERT (Tier 3), інтегрованого у цифрову макромодель вулично-дорожньої мережі (ВДМ) у програмному забезпеченні PTV Visum, що дозволяє через побудову енергетичного балансу двигунів досягти високої точності моделювання паливних витрат та багатокomпонентної емісії. Підтверджено перевагу маршрутного методу оцінки викидів фази «холодного пуску», який забезпечує адекватне математичне наближення обсягів забруднення без залучення ресурсомістких процедур перерозподілу потоків.

Доведено, що його лінійно-протяжна Кривого Рогу топологія формує «червоні коридори» вздовж магістралей, де акумулюється понад 80% міських викидів парникових газів і твердих частинок. Виявлено «екологічний парадокс», за якого прагнення водіїв індивідуального та легкого комерційного транспорту (LCV) об'їхати центр збільшує їхній пробіг і зміщує емісію на периферійні дуги зі складним рельєфом, провокуючи сплески CO₂ (до 4856–5273 кг/доба) та сажі (до 108 г/доба від зносу гальм/шин у циклах розгін-гальмування). Водночас у регульованому центрі через світлофори питомі викиди CO та вуглеводнів на 1 км є вищими, ніж на швидкісних ділянках, тоді як екологічний слід важких вантажних автотранспортних засобів (вантажопідйомністю більше 3,5 т) чітко локалізовано в промзонах (Нікопольське шосе: 820 кг/доба CO₂), що підтверджує ефективність заборони на їхній в'їзд у житлову забудову.

Ключові слова: транспортне макромодельювання, PTV Visum, COPERT Tier 3, емісія автотранспорту, транспортний попит, лінійно-протяжна топологія, комерційний автопарк, холодний пуск, Кривий Ріг.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АТМОСФЕРИ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ В УМОВАХ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ КРИВОГО РОГУ	8
1.1. Моніторинг екологічної безпеки та динаміка промислового забруднення у місті Кривий Ріг	8
1.2. Вивчення рівня забруднення атмосферного повітря автотранспортом у місті Кривий Ріг: досвід натурних та аналітичних досліджень.....	14
1.3. Критичний аналіз обмежень існуючих підходів та обґрунтування застосування цифрового макромодельовання ВДМ	19
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ	20
2.1. Математичне обґрунтування COPERT	20
2.2. Практична реалізація алгоритмів COPERT	23
2.3. Класифікація розрахованих екологічних індикаторів.....	26
2.4. Моделювання додаткових викидів під час холодного пуску	27
2.5. Особливості параметризації користувацьких страт	29
2.6. Методика експериментального дослідження.....	30
2.7. Висновки до розділу 2	33
РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ	35
ВИСНОВКИ.....	48
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	50

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасний етап розвитку великих промислових центрів України характеризується надвисоким рівнем кумулятивного техногенного навантаження на навколишнє природне середовище. Місто Кривий Ріг є унікальним промисловим агломератом, екологічний стан якого визначається специфікою розміщення криворізького залізрудного басейну. Географічна лінійно-протяжність залізрудних родовищ зумовила відповідну просторову топологію вулично-дорожньої мережі, де промислові об'єкти гірничо-металургійного комплексу безпосередньо межують із житловими районами та магістральними комунікаційними коридорами.

Тривалий час головним чинником екологічного дисбалансу регіону вважалися стаціонарні джерела викидів (кар'єри, шахти, збагачувальні фабрики та металургійний комбінат). Проте стрімкі процеси автомобілізації (на 65% з 2008 р.) та постійне зростання обсягів приватного й комерційного автопарку сформували стійку тенденцію до децентралізації екологічних ризиків. Автомобільний транспорт перетворився на потужне пересувне джерело хронічного забруднення приземного шару атмосфери.

Актуальність проблеми посилюється тим, що наявна дорожньо-транспортна інфраструктура міста не повною мірою відповідає сучасній інтенсивності транспортних потоків. Пропускна здатність ключових транспортних вузлів, розв'язок та перехресть є обмеженою, що за умов лінійної структури міста призводить до виникнення систематичних заторів. Робота двигунів транспортних засобів у перехідних режимах (часті цикли гальмування, холостого ходу та розгону у вузлових зонах) провокує екстремальні локальні сплески емісії токсичних компонентів (оксиду вуглецю, діоксиду азоту, неметанових вуглеводнів та дрібнодисперсного пилу/сажі).

Як наслідок, якість повітряного середовища в межах житлової забудови та вздовж головних магістралей Кривого Рогу хронічно не відповідає встановленим

нормативам гранично допустимих концентрацій (ГДК). Це створює суттєве додаткове (синергетичне) навантаження на біосферу промислового регіону та здоров'я населення.

З огляду на це, виникає гостра науково-практична необхідність детального дослідження просторово-часових закономірностей розподілу транспортних потоків, диференційованого оцінювання екологічного сліду різних категорій автотранспорту та розробки комплексних інженерно-транспортних заходів з оптимізації організації дорожнього руху в межах сформованої інфраструктури міста.

Мета дослідження.

Теоретичне обґрунтування та практичне впровадження науково-методичного підходу до просторового оцінювання екологічного навантаження від рухомих джерел на приземний шар атмосфери лінійно-протяжного міста (на прикладі м. Кривий Ріг) шляхом інтеграції розрахункового комплексу COPERT (Tier 3) у транспортну макромодель PTV Visum для оптимізації управлінських та інженерно-транспортних рішень.

Задачі дослідження.

1. Провести аналітичний огляд існуючих науково-теоретичних досліджень щодо сучасного стану атмосферного повітря міста Кривий Ріг, визначити структуру техногенного навантаження та оцінити ступінь і специфіку впливу автомобільного транспорту на якість міського середовища.

2. Обґрунтувати ефективність застосування розрахункового комплексу COPERT (Tier 3), інтегрованого у макромодель в програмному забезпеченні PTV Visum, для побудови енергетичного балансу (витрат палива засобами автомобільного транспорту) та забезпечення високої точності оцінки емісії багатокомпонентних палив без потреби ресурсомісткого перерозподілу потоків.

3. Дослідити просторові закономірності формування «червоних коридорів» екологічного навантаження під впливом лінійно-протяжної топології мережі та поведінкових факторів перерозподілу транспортного попиту між центром і периферією міста Кривий Ріг.

4. Оцінити структуру та особливості емісії забруднюючих речовин за категоріями автопарку з урахуванням специфіки режимів їхнього руху у місті Кривий Ріг та діючих адміністративно-транспортних обмежень.

Об'єкт дослідження. Процес формування та просторового розподілу екологічного навантаження від автомобільного транспорту на приземний шар атмосферного повітря великого промислового міста з лінійно-протяжною топологією.

Предмет дослідження. Закономірності, просторові структури, особливості розподілу транспортного попиту та обсяги диференційованої емісії забруднюючих речовин і парникових газів від різних категорій автопарку в межах вулично-дорожньої мережі міста Кривий Ріг.

Методи та інструменти дослідження. Огляд джерел, порівняння, статистичний аналіз, узагальнення, методи транспортного макромодельовання, математичне та екологічне модельовання, маршрутний метод оцінювання, методи порівняльного, системного та просторового аналізу.

Практичне значення одержаних результатів.

Інтегрований комплекс PTV Visum та COPERT Tier 3 дозволяє органам місцевого самоврядування та транспортним інженерам прогнозувати екологічні наслідки перерозподілу потоків і децентралізації викидів ще на етапі планування об'їзних маршрутів чи реконструкції доріг у м. Кривий Ріг.

Структура і обсяг роботи. Бакалаврська робота складається з реферату, вступу, 3-х розділів, висновків, списку використаних джерел з 14 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 51 с.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АТМОСФЕРИ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ В УМОВАХ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ КРИВОГО РОГУ

1.1. Моніторинг екологічної безпеки та динаміка промислового забруднення у місті Кривий Ріг

Екологічне навантаження на атмосферний повітряний басейн м. Кривий Ріг зумовлене високою концентрацією промислових об'єктів. Зокрема, на підприємства гірничо-металургійного комплексу (ГМК) припадає 99,6% від сумарного обсягу міських викидів від виробництв у місті. Пріоритетний деструктивний вплив чинять 10 найбільших суб'єктів господарювання, серед яких ключовими є ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (у 2017 р. емісія від його стаціонарних джерел забезпечила 80% загальноміського показника) [1]. Вагомим чинником антропогенного впливу на глобальні кліматичні зміни є емісія парникових газів (діоксиду вуглецю, метану, діоксиду азоту). У їхній компонентній структурі домінує вуглекислий газ, частка якого сягає 99,9%.

Аналіз часового ряду (2015–2024 рр.) [2] дозволяє чітко виділити три ключові етапи зміни екологічного навантаження у м. Кривий Ріг.

Період відносної стабільності з піковим навантаженням (2015–2017 рр.). Максимальні обсяги викидів зафіксовані у 2016 році (342,02 тис. тон), що супроводжувалося найвищою щільністю забруднення (795 тон/км²) та найбільшим навантаженням на одного мешканця (538 кг/особу).

1. Період поступового зниження викидів (2018–2021 рр.). Спостерігається плавне зменшення абсолютних обсягів викидів (варіюються в межах 223,9 – 269,9 тис. тон). Питомі викиди на тонну продукції знизилися майже вдвічі порівняно з піковим 2017 роком (2,90 кг/тон) до 1,24 кг/тон у 2021 році.

2. Період різкого спаду та стабілізації на низькому рівні (2022–2024 рр.). У 2022 році відбувся критичний спад усіх показників (абсолютні викиди впали до 63,4 тис. тон, тобто майже в 3,5 рази порівняно з 2021 роком). Протягом 2023–2024 років фіксується незначне коливання обсягів із утриманням низьких значень порівняно з докризовим періодом.

Додатковим джерелом нестаціонарного пилогазового забруднення території є відкриті гірничі роботи: в межах міста функціонують 8 діючих кар'єрів, де щорічно здійснюється понад 200 масових промислових вибухів [1].

За підсумками 2024 року внаслідок вибухових робіт, проведених на кар'єрах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», АТ «ПВДГЗК», ТОВ «РУДОМАЙН», ТОВ «УГК», а також ГЗК структури «Метінвест» (ЦГЗК, ІНГЗК, ПІВНГЗК), зафіксовано такі показники:

- Кількість промислових вибухів: 188 операцій.
- Маса використаних безтритилових сумішей: 49,4 тис. тон (фіксується приріст на 48% відносно попереднього року).
- Обсяг розроблених гірничої маси: 45,7 млн м³ (абсолютне зростання склало 33% порівняно з 2023 роком).

Активізація видобувних процесів призвела до суттєвого погіршення екологічних метрик. Сумарна емісія забруднювачів у повітряний басейн під час проведення вибухів сягнула 1,6 тис. тон, продемонструвавши стрибок на 55% порівняно з минулим звітним періодом.

У структурі утворюваних газопилових хмар абсолютно домінує тверда дисперсна фаза (пил), на яку припадає 92% від загального обсягу. Інша частина припадає на газоподібні продукти детонації, зокрема оксид вуглецю та діоксид азоту [2].

В роботі [3] розглядається нормативно-правова база моніторингу, структура екологічної інформації державних відомств та загальний стан забруднення повітря в містах України за даними Центральної геофізичної обсерваторії. Детально

описано дворівневу автоматизовану систему моніторингу Кривого Рогу (міські пости та пости промислових підприємств), що працює в онлайн-режимі.

За допомогою програмного комплексу Surfer автори [3] здійснили картографування та моделювання просторового розповсюдження пилу на території міста. Також у статті наведено динаміку викидів, проаналізовано вплив найбільших промислових підприємств (ГЗК, АрселорМіттал тощо) та перелічено конкретні технологічні заходи (модернізація фільтрів, закриття застарілих агрегатів), які впроваджуються для покращення екологічного балансу та пилопригнічення.

Загальнонаціональний масштаб моніторингу (І півріччя 2020 року): 39 міст України охоплено оцінкою стану забруднення атмосфери, 129 стаціонарних постів державної системи моніторингу гідрометеослужби задіяно загалом. Встановлено, що 10 міст (міста Кам'янське, Одеса, Дніпро, Кривий Ріг, Київ, Миколаїв, Херсон, Черкаси, Запоріжжя, Кременчук) мали *високий* рівень забруднення, 11 міст - *підвищений* рівень, 17 міст — *низький* рівень, в 16 містах зафіксовано зниження рівня забруднення порівняно з попереднім роком.

Структура моніторингу в м. Кривий Ріг [3]: 5 міських та 23 автоматизованих пости промислових підприємств діють у місті для безперервного виміру, 6 основних речовин підлягають постійному контролю: діоксид азоту (NO_2), оксид азоту (NO), сірчаний ангідрид (SO_2), оксид вуглецю (CO), аміак (NH_3), сірководень (H_2S), пил.

На 2 постах (ПАС №3 та ПАС №5) додатково контролюються етан (C_2H_6) та озон (O_3), 6 постів державної системи моніторингу також функціонують у місті (5 - від Лабораторії спостережень, 1 - від Криворізького міського відділу лабораторних досліджень у Покровському районі), 15 точок в усіх районах міста щомісячно охоплюються додатковими лабораторними дослідженнями якості повітря. Періодичність оновлення даних в онлайн-режимі щодо максимально разових концентрацій речовин та метеопараметрів – становить 1 година.

Динаміка викидів та індексу забруднення (ІЗА). На 5% знизився рівень ІЗА для Кривого Рогу у I півріччі 2020 року порівняно з 2019 роком: значення впало з 12,7 до 12,0. На 31,5% зменшено обсяг викидів забруднюючих речовин у місті у 2020 році порівняно з базовим 2015 роком (згідно зі Стратегією державної екологічної політики до 2030 року). На 17% зменшено обсяг викидів у 2020 році порівняно з 2019 роком. На 13% відбулося сумарне зменшення індексу ІЗА по відношенню до 2010 року.

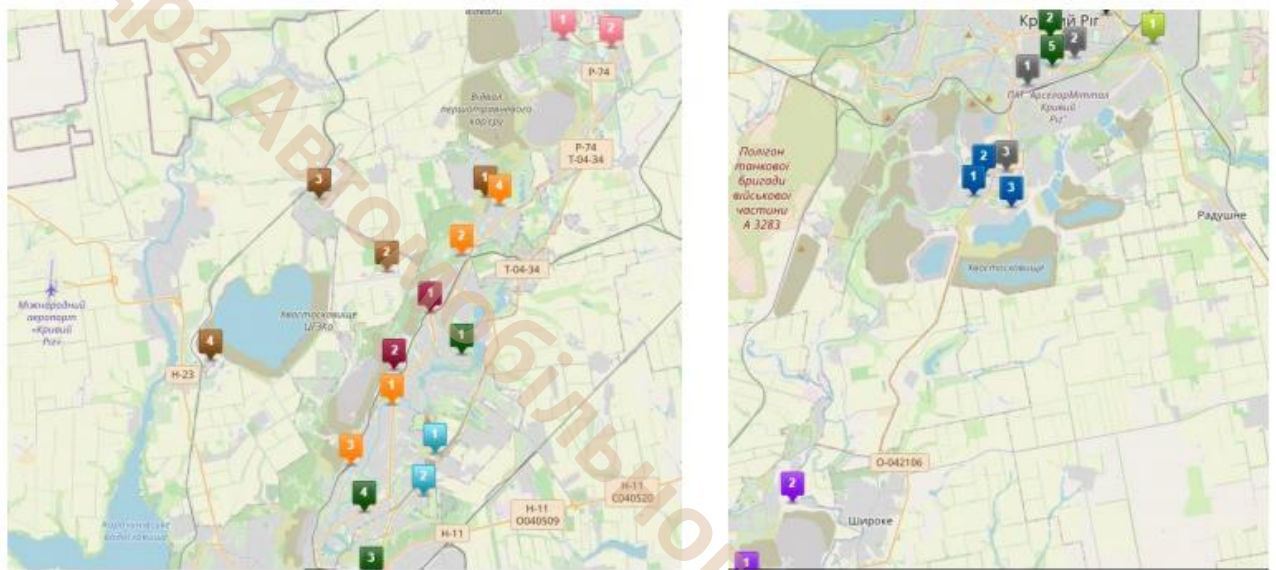


Рис.1.1. Розташування постів моніторингу у м. Кривий Ріг: північна частина (ліворуч) і південна (праворуч) [3]

Вплив окремих підприємств (динаміка 2020 року до 2019 року). Зниження викидів зафіксовано на ПрАТ «Південний ГЗК», ПрАТ «Північний ГЗК», ПрАТ «Інгулецький ГЗК». Збільшили викиди: «АрселорМіттал Кривий Ріг» — на 5%; «МЕТІНВЕСТ, Криворізький ремонтно-механічний завод» — на 8%; «Кривий Ріг Цемент» — на 3%.

Частки основних забруднюючих речовин у повітрі міста.

За даними досліджень, склад забруднення розподілився так:

- Оксид вуглецю (CO) — 77%;

- Пил — 13%;
- Діоксид азоту (NO_2) — 5%;
- Діоксид сірки (SO_2) — 4%;
- Інші речовини (метан, аміак, сірководень, фенол, оксид азоту) — 1%.

Результати моделювання викидів пилу та аналіз стабільності.

Найбільші концентрації пилу зафіксовані у липні та жовтні 2022 р. в районах розміщення підприємств ГЗК, вздовж залізничних покладів та навколо «АрселорМіттал Кривий Ріг». Досліджено, що концентрація викидів пилу за днями є приблизно однаковою та не залежить від дати у місяці.

Згідно з порівняльною таблицею (листопад 2021 р. та червень 2022 р.): максимальне відхилення між значеннями склало всього 3,7% (в абсолютному вимірі $0,037 \text{ мг/м}^3$), мінімальне відхилення склало - 0,9% (в абсолютному вимірі $-0,009 \text{ мг/м}^3$).

Такі коливання автори називають невагомими, що підтверджує стабільну інтенсивність пилення техногенних джерел.

Екологічний ефект від модернізації.

Заміна електрофільтра у корпусі грохочення (ПрАТ «ПівнічГЗК») забезпечила зниження викидів забруднюючих речовин на 125 тонн на рік.

Попри загальну позитивну тенденцію до зниження викидів та зменшення ІЗА, фактичні концентрації пилу, діоксиду азоту та формальдегіду в Кривому Розі все ще перевищують допустимі гігієнічні норми (ГДК). Для розв'язання цієї проблеми автори пропонують продовжувати впровадження заходів Міської екологічної програми (2016–2025 рр.) та використовувати сучасні системи екологічного картографування для точного моніторингу ситуації.

Усереднені дані лабораторних вимірювань за період з квітня по жовтень 2020 року визначають обсяги концентрації конкретних токсичних речовин в атмосфері міста (в мг/м^3), а також позицію Кривого Рогу серед 16 найбільших агломерацій України (де 1 місце — найгірший показник/найвища концентрація) [4].

Завислі речовини (ЗР): концентрація становить 3,56 мг/м³. За цим показником Кривий Ріг посідає 1 місце в Україні, демонструючи критичний рівень запиленості.

Сірчаний ангідрид (SO₂): концентрація становить 0,32 мг/м³. Місто займає 14 місце (відносно низький показник серед інших міст).

Оксид вуглецю (CO): концентрація становить 0,62 мг/м³. Кривий Ріг посідає 5 місце в рейтингу .

Діоксид азоту (NO₂): концентрація - 1,21 мг/м³. Місто займає 11 місце.

Оксид азоту (NO): концентрація становить 0,38 мг/м³. Місто посідає 13 місце.

Фенол (C₆H₆O): концентрація - 0,72 мг/м³. Місто займає 5 місце.

Формальдегід (CH₂O): Концентрація становить 6,58 мг/м³. За цим небезпечним показником Кривий Ріг посідає 2 місце в Україні (із значенням 7,82 мг/м³).

Загальна сума вимірюваних забруднювальних речовин у Кривому Розі становить 13,7, що є одним із найвищих валових показників забруднення серед усіх досліджених міст (подільне 2-3 місце в Україні разом з Одесою, поступаючись лише Дніпру з показником 14,1).

Робота [5] присвячена вирішенню актуальної екологічної та технологічної проблеми Кривбасу - зниженню запиленості атмосферного повітря, яка виникає через рух важких технологічних автосамоскидів кар'єрними дорогами під час транспортування гірничої маси. Кар'єрний дорожній пил містить дрібнодисперсні частинки (зокрема кварцу, шин та гальмівних колодок). Найбільш небезпечними є фракції PM_{2,5}, які проникають у дихальну й кровоносну системи, викликаючи серцево-судинні та легеневі захворювання у робітників.

Висока запиленість суттєво погіршує видимість на технологічних автошляхах (особливо вночі), що підвищує ризик виникнення аварійних ситуацій.

Пил виноситься за межі промислових зон, забруднюючи атмосферу прилеглих житлових районів міста Кривий Ріг (індекс ІЗА якого у 2021 р. досягав високого рівня — 12,1).

Автори [5] розглядають та обґрунтовують кілька взаємодоповнюючих підходів для боротьби з пилоутворенням.

Традиційне зрошення водою влітку неефективне через швидке випаровування. Автори пропонують розраховувати питомі витрати води за математичною формулою, яка враховує температуру поверхні дороги, температуру та швидкість руху повітря.

Для забезпечення пролонгованого вологоутримання та консолідації щебеневого покриття доцільно застосовувати водний розчин солей магнію (зокрема, бішофіту). Його наносять після попереднього змочування дороги водою, щоб запобігти руйнуванню захисної плівки колесами самоскидів.

Стаття [5] спирається на відкриття 2023 року про те, що на межі контакту води та повітря в краплях спонтанно виникає електричне поле і генеруються гідроксид-іони (ОН-), які діють як природні окиснювачі та очищують нижні шари атмосфери. Для цього пропонується впроваджувати спеціальні системи високого тиску — туманотвірні гармати.

Як альтернативу хімічним розчинам розглянуто досвід Південного ГЗК із використання суспензій синьо-зелених і зелених мікроводоростей (із додаванням бактерій *Pseudomonas*). Вони виділяють слиз, який буквально склеює дрібні частинки породи, утворюючи міцну кірку (товщиною до 1,2 МПа), яка в 10–30 разів підвищує стійкість поверхонь до вітрової ерозії.

1.2. Вивчення рівня забруднення атмосферного повітря автотранспортом у місті Кривий Ріг: досвід натурних та аналітичних досліджень

У роботі [5] для моніторингу забруднення атмосферного повітря від автомобільного транспорту обрали 4 завантажені ділянки (перехрестя та магістралі, що ведуть до промзон або об'їзних доріг) у двох районах міста, які знаходяться на значній відстані один від одного:

Металургійний район (центр/південь): Ділянка 1 (пр. Металургів – вул. В. Бизова) та Ділянка 2 (пр. Металургів – вул. Нікопольське шосе).

Тернівський район (північ): Ділянка 3 (вул. Сурикова – вул. С. Колачевського) та Ділянка 4 (вул. А. Головка – автошлях Р74).

Підрахунок транспорту здійснювали у пікові години (з 8:00 до 9:00) методом візуальних позначень. Щоб вивести середнє арифметичне, заміри робили тричі у різні дні тижня (понеділок, четвер, субота). Машини фіксували за типами (легкові, автобуси, легкі, середні та важкі дизельні вантажівки). На кожній точці оцінювали супутні фактори: ступінь аерації (забудови), поздовжній нахил дороги, швидкість вітру, відносну вологість повітря та тип перехрестя.

Розрахунок концентрації чадного газу (СО) проводили за формулою Бегма (модифікованою Шаповаловим). Вона враховує фонове забруднення ($0,5 \text{ мг/м}^3$), кількість авто за годину та систему поправочних коефіцієнтів для кожного типу авто й метеоумов.

На всіх ділянках абсолютно переважає легковий автотранспорт й складає від 42% до 50% від усього транспортного потоку. Частка вантажних автомобілів коливається від 11% до 25% (найбільше середніх вантажівок на Ділянці 2 — 345 од./год).

Рівень завантаженості:

- Ділянка 4 має *середню* інтенсивність (17 122 авт./добу).
- Ділянки 1, 3 та 2 мають *високу* інтенсивність. Найбільш завантаженим виявився проспект Металургів на перетині з Нікопольським шосе (Ділянка 2), де зафіксовано 32 640 авт./добу.

Оскільки легкових машин у місті найбільше, саме на них припадає майже 50% усіх шкідливих викидів чадного газу в атмосферу на досліджуваних ділянках.

Кількість викидів СО прямо пропорційна завантаженості доріг. Найчистішою (серед досліджених) є Ділянка 4 у Тернівському районі — 26,278 л/год (630,672

л/добу). Найбільш екологічно напруженою є головна артерія міста — проспект Металургів (Ділянка 2), де викиди СО сягають 40,006 л/год (960,144 л/добу).

Визначено, що 80,4% автобусів та 85,5% вантажних автомобілів у місті експлуатуються понад 10 років, що суттєво погіршує екологічну ситуацію. Сформульовано рекомендації для Кривого Рогу: переорієнтація вантажних потоків на об'їзні шляхи, впровадження палива (газу) та екологічних стандартів Євро, а також розширення практики оптимізації світлофорів типу «Зелена хвиля» (як на ділянці від 95-го кварталу до виїзду на Дніпро зі швидкістю 55–60 км/год), що виключає холостий хід двигунів.

За результатами досліджень у 2024 р. [6] встановлено, що рівень запиленості атмосферного повітря в Кривому Розі прямо залежить від інтенсивності транспортного потоку та кліматичних факторів, демонструючи стійке зростання при підвищенні температури й падінні вологості. У літні місяці (червень–серпень) на ділянці з інтенсивним рухом (проспект Миру) зафіксовано суттєві перевищення екологічних норм ВООЗ для часток РМ 2,5 та РМ 10, які в аномально спекотному липні досягли пікових значень і перевищили дозволені максимуми більш ніж удвічі (42,55 мг/м³ та 92,61 мг/м³ відповідно).

Авторами [7] проведено натурні спостереження за інтенсивністю дорожнього руху у місті Кривий Ріг у пікові години (з 8:00 до 10:00 ранку) із диференціацією транспорту за типами (легкові, вантажні, автобуси, мотоцикли). За допомогою європейської методики ЕМЕР/ЕЕА 2019 розраховано масу викидів основних забруднюючих речовин в грамах за секунду (г/с) та тоннах (т) для відрізка дороги завдовжки 250 метрів.

Локації дослідження (3 ділянки з високою інтенсивністю):

1. Вул. Вільної Ічкерії - найбільша інтенсивність руху (4384 од/год, з яких 3332 - легкові автомобілі, 720 - автобуси, 252 - вантажні автомобілі).

2. Перехрестя проспекту Металургів та Нікопольського шосе - загальне транспортне навантаження становило 3468 од/год (відзначено високу частку важкого дизельного транспорту — 368 вантажівок та 596 автобусів).

3. Проспект Центральний - найменш завантажена серед трьох ділянок (1648 од/год).

Головними забруднювачами визначено оксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO_2) та неметанові леткі органічні сполуки (ЛОС). Найбільший екологічний вплив автотранспорту зафіксовано на вул. Вільної Ічкерії, де сумарний викид шкідливих речовин за одну годину пікового навантаження досяг 0,008563 тонни (зокрема, викид CO становив 1,15 г/, а NO_x — 0,71 г/с. На перехресті пр. Металургів – Нікопольське шосе через значну кількість дизельної техніки зафіксовано високі питомі викиди оксидів азоту (0,63 г/с) та твердих часток / сажі.

Ці ж автори суттєво розширили теоретичну та інфраструктурну базу дослідження у 2024 році [8]: мережу моніторингових точок збільшено з 3 до 10 ключових транспортних вузлів Кривого Рогу.

Проведено натурний збір даних щодо інтенсивності руху в період з 01.04.2024 по 31.08.2024 (згідно з календарним планом). Проаналізовано вплив геометричної конфігурації та типу дорожніх розв'язок (регульовані перехрестя, нерегульовані ділянки, круговий рух) на обсяги накопичення вихлопних газів.

Кільце 95 Квартал (нерегульований круговий рух) – найбільше завантаження: 86 478,3 од/добу.

Вул. Вільної Ічкерії (регульоване Т-подібне перехрестя) — 81 852,4 од/добу

Перехрестя пр. Металургів і Нікопольське шосе (регульоване) — 68 723,4 од/добу.

Проспект Центральний – проспект Миру (регульоване перехрестя) — 56 861,0 од/добу.

Вул. Едуарда Фукса (регульоване перехрестя) — 47 207,2 од/добу.

Дніпропетровське шосе (регульоване перехрестя) — 38 791,3 од/добу.

Вул. Піщана (регульоване Т-подібне перехрестя) — 34 787,2 од/добу.

Площа Олександра Поля (нерегульований круговий рух) — 33 885,8 од/добу.

Район станції Рокувата (регульоване Т-подібне перехрестя) — 28 679,8 од/добу.

Міст перед Південним ГЗК (нерегульований з'їзд) — 21 901,7 од/добу.

Розраховано секундні викиди для 8 компонентів вихлопу (CO , легкі органічні сполуки - ЛОС, NO_x , N_2O , NH_3 , тверді частинки, CO_2 , SO_2) для всіх 10 локацій. Встановлено, що найбільші обсяги емісії шкідливих речовин відбуваються на вул. Вільної Ічкерії (CO — 1,211 г/с, NO_x — 0,634 г/с, Тверді частинки — 0,024 г/с та на Кільці 95 Квартал (CO — 1,037 г/с, NO_x — 0,600 г/с).

Виявлено важливу закономірність: на розв'язках із круговим рухом (Кільце 95 Квартал, Площа Ол. Поля) через режим гальмування/рушання та специфіку роботи двигунів викиди діоксиду азоту (NO_x) є значно вищими, тоді як викиди оксиду вуглецю (CO) дещо нижчі порівняно зі звичайними перехрестями.

Доведено, що на ділянках, які суміщені з об'їзними шляхами (наприклад, Дніпропетровське шосе, Нікопольське шосе), суттєво зростає концентрація важких дизельних часток через домінування вантажного транзитного транспорту.

Автори [7, 8] дійшли висновку: у Кривому Розі зафіксовано ефект сумації забруднення. Токсичні вихлопи автомобілів концентруються у приземному шарі повітря (на рівні дихання людини 1,5–2 м) безпосередньо в зонах житлової забудови, що створює критичне додаткове екологічне навантаження на міське середовище, яке вже сильно деформоване викидами стаціонарних промислових підприємств ГМК.

Найбільш забруднені локації від автотранспорту також були визначені в результаті останнього дослідження [9] (рис.1.2). Як видно з рис.1.2, вузлові точки транспортної мережі, які характеризуються великими транспортними навантаженнями, є критичними з точки зору екологічної безпеки.

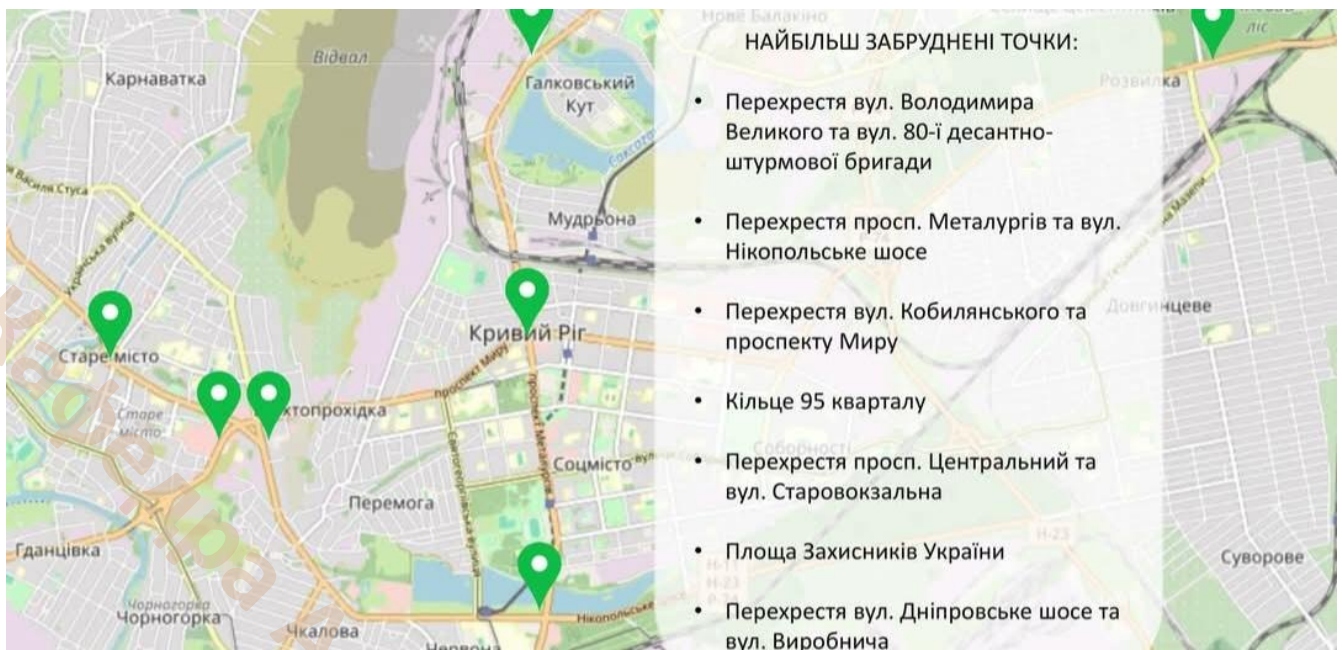


Рис. 1.2. Перехрестя у м. Кривий Ріг із найбільш забрудненим повітрям.

1.3. Критичний аналіз обмежень існуючих підходів та обґрунтування застосування цифрового макромодельовання ВДМ

Позитивною практикою для міста Кривий Ріг є можливість відслідковування (моніторингу) стану атмосферного повітря в режимі реального часу [11, 12]. Основна частину викидів шкідливих речовин у повітря приходить на підприємства ГМК [1 – 4]. У той же час, питанню забруднення повітря від автотранспорту у м. Кривий Ріг присвячено ряд робіт [5- 8]. Однак дані дослідження обмежені кількістю локацій (до 10 по місту), для яких визначена інтенсивність транспортних потоків, або локацій прямого вимірювання стану повітря (що не дозволяє у повній мірі визначити вплив на якість повітря саме автотранспортних засобів). Дана робота відрізняється можливістю врахування обсягів викидів шкідливих речовин в повітря атмосфери, які виникають від автотранспорту в результаті перерозподілу потоків транспорту по всій вулично-дорожній мережі міста за рахунок цифрової транспортної моделі міста, що корінним чином відрізняє дане дослідження від існуючих для м. Кривий Ріг.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

2.1. Математичне обґрунтування COPERT

Програмний комплекс COPERT (*Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport*) [13] призначений для моніторингу обсягів енергоспоживання та обчислення викидів в атмосферне повітря шкідливих речовин на основі кінематичних параметрів транспортного руху, геометрії вулично-дорожньої мережі (ВДМ) та структурних характеристик рухомого складу.

Формалізований розрахунок загального обсягу спаленого палива для конкретного елемента транспортного графа або виділеного масиву кореспонденцій описується системою рівнянь. Для поодинокі ланки мережі масові або об'ємні витрати визначаються як:

$$U_{link} = U_f \cdot E \cdot L$$

де U_{link} - сумарний обсяг палива, витраченого на аналізованому відрізку, кг (або л); U_f - інтегральний емісійний множник, що відображає питоме споживання енергоресурсів і є функцією від конструктивних особливостей рухомого складу, швидкісного режиму, рівня завантаження інфраструктури (LOS), поздовжнього профілю шляху (нахилу) та специфіки сполучення (урбанізовані території чи заміські автодороги); E - розрахункова інтенсивність руху (пасажиро- або вантажопотік); L - просторова протяжність елемента мережі.

Усереднене значення питомої витрати енергоносіїв з урахуванням неоднорідності рухомого складу обчислюється за формулою:

$$U_f = \sum_{i=1}^n P_i \cdot U_i(v, LOS, t)$$

де U_f - питома вага (частка) автомобілів технологічного класу в загальній структурі потоку; n - кількість виділених класифікаційних груп транспорту; $U_i(v, LOS, t)$ - базовий емісійний показник для транспортних засобів, обумовлений поточною швидкістю руху, якістю функціонування ланки мережі (LOS) та величиною її поздовжнього градієнта t .

За умови спільного функціонування на одній ділянці декількох розрахункових сегментів попиту, загальні паливні витрати акумулюються за відповідними напрямками:

$$U_f = \sum_{s=1}^m U_{fs} \cdot E_s \cdot L_s$$

де U_f - загальна кількість розрахункових сегментів попиту, зафіксованих на ланці; E_s - поточна інтенсивність руху сегмента; U_{fs} - зважений емісійний коефіцієнт для сегмента попиту, сформований на основі внутрішнього розподілу його транспортних страт.

У науковій практиці виділяють три рівні деталізації екологічного аналізу:

- *Перший рівень (Tier 1):* Алгоритми базуються на узагальнених макроекономічних показниках реалізації палива пасажирським та вантажним транспортом на загальнодержавному рівні. Для традиційних видів палива (дизель, бензин, скраплений газ) збір цих відомостей не викликає ускладнень. Водночас облік споживання стисненого природного газу (СПГ) через специфіку локальних мереж заправляння потребує застосування математичних методів апроксимації. Макро-підхід *Tier 1* передбачає обов'язкове зведення паливного балансу, де сума палива за окремими групами

автомобілів повинна дорівнювати загальнонаціональним обсягам продажів. Нормативне питоме споживання для вантажівок середнього класу на цьому рівні приймається як стає значення — 216,8 г/км.

- *Другий рівень (Tier 2):* Розширює аналіз шляхом диференціації чотирьох базових категорій транспорту на підгрупи за екологічними стандартами (від Euro I до Euro VII). Дослідник оперує матрицями річного пробігу або узагальненими показниками транспортної роботи (транспортно-кілометрами) для кожної окремої технології двигуна.
- *Третій рівень (Tier 3):* Інтегрований у сучасні програмні комплекси макромодельовання, забезпечує найвищу точність. Він повністю відкидає статичне усереднення та розраховує емісію безпосередньо для кожної ланки транспортного графа на основі динаміки потоку, просторових похилів і поточних швидкостей.

З огляду на те, що сучасні автомобілі використовують складні паливні суміші з біодобавками (E5, B7), які мають неоднакову теплотворну здатність, класичне балансування палива в COPERT замінено на складання енергетичного балансу. Коригування розрахункових показників моделі під фактичні статистичні дані здійснюється за допомогою коефіцієнта корекції пробігу (*Mileage Correction Factor* — MCF), який масштабує середню активність рухомого складу. Скориговані параметри пробігу стають базою для фінального прорахунку екологічних метрик.

Для важкої техніки з бензиновими двигунами оцінюються виключно «гарячі» викиди, а їхні коефіцієнти отримують шляхом математичної екстраполяції параметрів легших категорій ТЗ. Історія нормування дизельних двигунів великої потужності (масою понад 3,5 т) розпочалася з Регламенту ЕСЕ 49, за яким транспорт класифікується як «звичайний». Подальша еволюція екологічного законодавства супроводжувалася суттєвим зниженням граничних обмежень: впровадження стандартів Euro I та Euro II встановило жорсткі ліміти на сажу та оксиди азоту. Стандарти Euro III, IV та V послідовно зменшили викиди оксидів

азоту (більш ніж на 70%) та твердих частинок (понад 85%) завдяки застосуванню систем селективного каталітичного відновлення (SCR).

Сучасні жорсткі вимоги Euro VI (діють з 2013/2014 рр.) ввели обов'язковий облік умов холодного пуску та використання сажових фільтрів і рециркуляції газів (EGR). Перспективний регламент Euro 7 (Euro VII) поширює контроль на раніше нерегульовані речовини, зокрема закис азоту (N_2O), додатково знижуючи граничні норми на 50% та твердих частинок на 20%.

Нова класифікація важкого транспорту узгоджена з європейським стандартом VECTO (Регламент 2017/2400) і враховує конфігурацію шасі, колісну формулу, повну масу та корисне навантаження. У середовищі COPERT дизельні вантажівки розділені на жорсткі та зчленовані (автопоїзди), де критерієм виступає повна дозволена маса ТЗ [43]. Програма забезпечує автоматичний двосторонній перерозподіл та імпорту/експорту даних між стандартною класифікацією COPERT та реєстраційними вимогами Регламенту (ЄС) 2018/956, що нівелює потребу у повному перерахунку емісійних множників під час зміни форматів даних.

2.2. Практична реалізація алгоритмів COPERT

Починаючи з версії 2025 року, розрахунковий апарат COPERT повністю інтегрований у середовище *PTV Visum* [14]. Програмний комплекс дозволяє обчислювати екологічні індикатори приватного, вантажного та громадського транспорту на основі результатів моделювання попиту. Інтегровані модулі аналізують картограми завантаження мережі та обсяги кореспонденцій, надаючи досліднику інструменти для гнучкого формування складів автопарків. Користувач має можливість налаштовувати відносні частки різних технологічних страт ТЗ, зіставляти вагові коефіцієнти підкатегорій та візуалізувати їх за допомогою графічних засобів.

Реалізований аналіз обсягів емісії за методологією COPERT у програмному комплексі *PTV Visum* забезпечив визначення маси цільових забруднюючих речовин, а також додаткових обсягів викидів, що генеруються під час холодного пуску двигунів внутрішнього згоряння. Порівняно з альтернативним підходом HBEFA, застосована процедура є спрощеною та характеризується вищою здатністю до макро-агрегації, оскільки базується на оптимізованому масиві вхідних дескрипторів, де ключовими математичними індикаторами виступають просторові швидкості, обсяги попиту (інтенсивність) та диференційований склад парку ТЗ.

Під час проведення розрахунків враховано просторову специфіку платформи *PTV Visum*, де моделювання екологічних показників здійснюється виключно на рівні відрізків (ланок) транспортного графа. Емісійні характеристики для вузлів перехресть, поворотів (*turns*), головних поворотів (*main turns*) та з'єднувальних елементів / вузлів примикання (*connectors*) у межах даної процедури до загального балансу не включалися.

Процес оцінювання екологічних параметрів функціонування транспортної системи було реалізовано за такою послідовністю:

1. Конструювання структури автопарку.

На підготовчому етапі деталізовано компонентний склад парку автотранспорту у міській мережі. Розрахунковий апарат COPERT адаптовано до офіційних статистичних структур рухомого складу, розподілених за календарними роками та функціональними класами. Додатково сформовано індивідуальні користувацькі шари попиту для транспортних засобів, які, окрім локальних параметрів, поєднували вбудовані системні категорії та готові емісійні шаблони COPERT.

2. Активація та режими розрахункової процедури

Розрахунок екологічних індикаторів виконувався за допомогою спеціалізованого макромодуля COPERT як для ізольованих, так і для

конгломератних сегментів транспортного попиту одночасно. Моделювання реалізовано у двох розрахункових варіаціях:

- **Статичний підхід:** Оцінювання проведено в межах фіксованого періоду аналізу (AP — доба). Статичні перерозподіли базуються на значенні середньої швидкості за розрахунковий період.
- **Динамічний підхід:** Забезпечено погодинну та інтервальну дискретизацію емісійних параметрів для кожного окремого часового зрізу. Такий режим можливий виключно за умови наявності в розробленій моделі розрахованих картограм завантаження мережі та обсягів руху для окремих часових інтервалів аналізу.

Для кожної ланки транспортної мережі в автоматичному режимі визначалися та враховувалися такі вихідні параметри:

- **Просторова швидкість руху:** Визначається за результатами перерозподілу потоків як середня швидкість за фіксований проміжок часу.
- **Клас поздовжнього похилу (градієнта):** Для важкого транспорту та автобусного парку геометричні параметри похилів лінків категоризовано за такою шкалою:

Діапазон фактичних значень похилу	Прийнятий розрахунковий клас градієнта
менше -5 %	-6 %
від -5 % до менше -3%	-4 %
від -3 % до менше -1%	-2 %
від -1 % до менше 1%	0 %
від 1 % до менше 3%	2 %

Математичний алгоритм визначення маси «гарячих» викидів (*warm emission*) полягав у множенні емісійного коефіцієнта, зваженого за швидкісним режимом для кожної цільової речовини та обраного складу флоту, на значення атрибута обсягу руху (AP) відповідного сегмента попиту та просторову довжину відрізка. Отримані

значення через відповідні коефіцієнти екстраполяції (проекції) фіксувалися в системних атрибутах ланок (AP) і акумулювалися в межах усього транспортного графа.

При динамічному режимі емісійний множник для конкретного часового інтервалу множився на інтенсивність руху в цьому ж інтервалі та довжину дуги, з подальшим збереженням результатів у відповідних часозалежних субатрибутах.

2.3. Класифікація розрахованих екологічних індикаторів

Усі екологічні метрики, отримані під час моделювання в середовищі *PTV Visum*, структуровано за трьома цільовими групами:

- **Група 1: Енергоспоживання та паливні витрати**

- *EC (Energy consumption)*: Загальні витрати енергії автопарком, [МДж].
- *Gasoline (Бензин)*: Сумарна маса спожитого бензину, [г].
- *Diesel (Дизельне паливо)*: Сумарна маса спожитого дизельного палива, [г].
- *Electric vehicles (Електромобілі)*: Енергоспоживання електричного транспорту, [МДж].

Облік масових витрат палива виконувався виключно для тих страт транспортних засобів, де закладено чітку й унікальну ідентифікацію єдиного типу палива (виключаючи двопаливні системи типу *LPG BiFuel* або *FlexiFuel Vehicle*).

- **Група 2: Емісія парникових газів**

- *CO2 reported*: Задекларований обсяг діоксиду вуглецю (без урахування відновлюваної біокомпоненти).
- *CO2 ultimate*: Загальний (абсолютний) обсяг вуглекислого газу, розрахований на основі повного паливного балансу.

- *CO₂e*: Еквіваленти парникових газів, розраховані за двома паралельними циклами: «від бака до колеса» (*tank-to-wheel*) та «від свердловини до колеса» (*well-to-wheel*).
- *CH₄*: Маса викидів метану.
- *N₂O*: Обсяги виділення закису азоту (діазоту монооксид).

• **Група 3: Забруднювачі атмосферного повітря.**

- *BC exhaust / non-exhaust*: Емісія чорного вуглецю (сажі) відпрацьованих газів та за рахунок механічного зношення елементів (гальмівних накладок, шин).
- *PM₁₀ / PM₁₀ non-exhaust*: Тверді дрібнодисперсні частинки фракції до 10 мкм (еліміновані двигуном та механічні).
- *PM_{2.5} / PM_{2.5} non-exhaust*: Тверді мікрочастинки фракції до 2.5 мкм (відповідно вихлопні та механічні).
- *PN₂₃*: Чисельна концентрація ультрадисперсних частинок розміром понад 23 нм.
- *NH₃ / SO₂ / NO₂*: Обсяги емісії аміаку, діоксиду сірки та діоксиду азоту відповідно.
- *HC / NMHC / Benzene*: Загальні вуглеводні, неметанові сполуки та бензол.
- *NO_x / CO / Pb*: Сумарні оксиди азоту, оксид вуглецю (чадний газ) та сполуки свинцю.

2.4. Моделювання додаткових викидів під час холодного пуску

Для оцінювання додаткового екологічного навантаження в фазі прогріву двигунів реалізовано алгоритм зважування емісійних коефіцієнтів відповідно до питомої ваги кожної міської транспортної страти. Розрахункова база забезпечила отримання значень питомих надлишкових викидів для кожного забруднювача та

прошарку ТЗ. Для сегментів, де емісійні дані щодо фази прогріву не регламентовані, значення приймалися рівними 0.

Розподіл надлишкової емісії холодного пуску по елементах ВДМ здійснювався двома способами, перемикання між якими контролювалося логічним атрибутом «*Calculate start excess based on routes at the origin zone*»:

1. Полігональний (геометричний) метод розрахунку (*Polygonal calculation*).

Застосовується з огляду на дифузний (просторово розмитий) характер точок зародження поїздок в урбанізованому середовищі. Оскільки в макромоделях маршрути починаються від абстрактного центру зони через конектори, реальний пуск двигунів відбувається на прилеглій території поблизу.

Для кожної зони відправлення розраховується абсолютна величина додаткових викидів холодного пуску як сума по сегментах попиту від добутку генерації району (*attraction*), частки нетеплових пусків та базового коефіцієнта емісії відповідного забруднювача. Отриманий масив викидів розподілявся пропорційно довжині на всі ланки мережі, відкриті для індивідуального транспорту (PrT), які потрапляли в радіус 1 км від опуклої оболонки вузла примикання (конектора) цієї зони.

2. Маршрутний метод розрахунку (*Calculation on routes*).

Процедура передбачає наскрізний аналіз усіх траєкторій руху сегментів попиту від пункту відправлення до пункту призначення. Для кожного відрізка, що входив до складу сформованого маршруту, обчислювалася частка надлишкового викиду пуску як інтеграл функції затухання за довжиною пробігу. Цей показник множився на обсяг руху на маршруті (картограму) та на частку холодного пуску в зоні відправлення цього маршруту.

Щоб отримати коректні значення, результат ділився на загальний обсяг сегмента попиту та множився на значення атрибута обсягу руху лінка. Оцінювання траєкторій обмежувалося першими 4 км пробігу, після чого функція затухання стабільно стає рівною 0. Розраховане значення множилося на коефіцієнт додаткових викидів холодного пуску для складу автопарку міських умов та

екстраполювалося на аналізовані періоди (AP). Описаний маршрутний алгоритм дає прийнятне математичне наближення без потреби у повному ресурсомісткому відтворенні моделі динамічного перерозподілу.

Усі отримані результати надлишкової емісії холодного пуску консолидувалися в межах загального графа мережі та відображалися у зведених відомостях «Emissions». Якщо для сегмента попиту відсутні розраховані маршрути, додаткові викиди холодного пуску прораховані не будуть. Це безпосередньо стосується ситуацій моделювання руху регулярних автобусів через штучно створений сегмент попиту, обсяг якого задавався кількістю рейсів (що відповідає роботі автобусів на маршрутах із уже прогрітими двигунами).

2.5. Особливості параметризації користувацьких страт

При введенні в модель унікальних, визначених користувачем страт транспортних засобів, діють однакові правила застосування коефіцієнтів емісії за умови дотримання таких інженерних вимог.

Категорійний статус транспортних засобів (ТЗ) за класифікацією COPERT визначає ступінь деталізації вхідних коефіцієнтів. Для легкового, легкого комерційного транспорту та категорії *L* коефіцієнти вносяться для кожного швидкісного класу. Для важкої вантажної техніки та автобусів забезпечено обов'язкову двовимірну дискретизацію — за класами швидкості та класами позовжнього похилу (градієнта). За відсутності коефіцієнтів для окремих розрахункових похилів алгоритм автоматично використовує емісійні дані сусідніх (найближчих доступних) ешелонів градієнта.

Для коректного врахування користувацьких страт коефіцієнти викидів мають бути чітко визначені для всіх забруднюючих речовин, які планується розрахувати. Наявність порожніх значень в атрибутах автоматично прирівнюється системою до нульових викидів.

Контроль за станом виконання розрахунків та фіксація потенційних помилок (наприклад, повідомлення про відсутність емісійних коефіцієнтів для специфічних комбінацій параметрів) здійснювалися шляхом постійного аналізу системного розрахункового журналу програмного комплексу після завершення процедури COPERT.

2.6. Методика експериментального дослідження

Експериментальне оцінювання енергетичної ефективності та екологічних параметрів легкових та вантажних автомобілів реалізовано шляхом поєднання розрахункових можливостей макромоделі ВДМ у середовищі *PTV Visum* [14] та аналітичного апарату методики COPERT [13]. Структурна схема алгоритму дослідження наведена на рис. 2.1.

Просторову структуру досліджуваного урбанізованого простору міста Кривий Ріг було формалізовано за допомогою методів транспортного районування. У межах побудованої моделі виділено 238 транспортних зон, розміри та межі яких збалансовано для забезпечення високої точності розрахунків без надмірного обчислювального навантаження. Граф мережі містить повну класифікацію вулично-дорожньої інфраструктури за категоріями та функціональним призначенням.

Повний цикл розроблення та налаштування моделі транспортних потоків охоплював такі послідовні етапи:

1. **Генерація поїздок.** Розраховано обсяги відправлення та прибуття вантажів (пасажирів) для кожної виділеної зони.

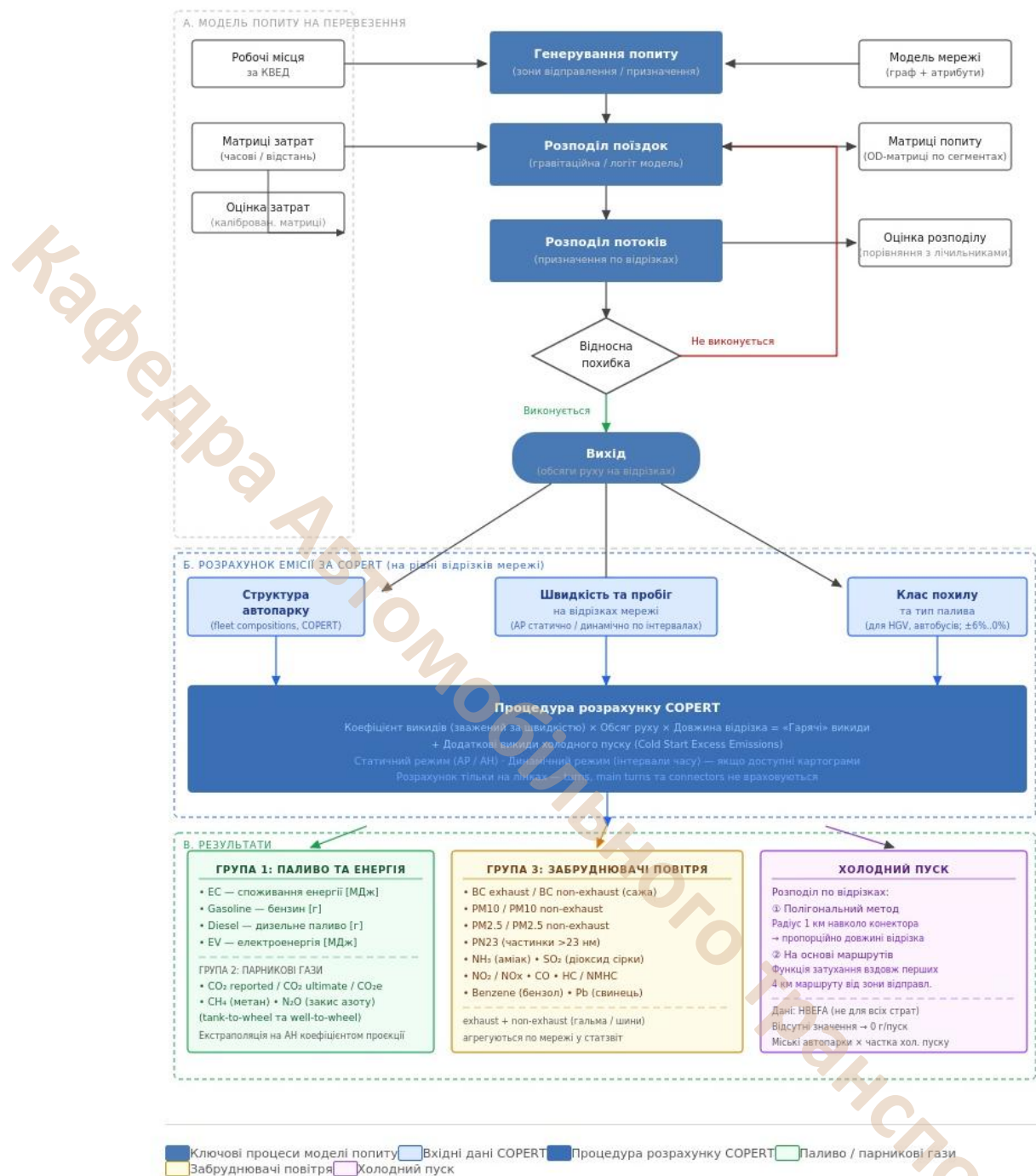


Рис.2.1. Схема дослідження

2. **Розподіл поїздок.** Просторову кореспонденцію між районами визначено за допомогою математичного апарату гравітаційного моделювання, яке оцінює ймовірність взаємодії між зонами на основі їхнього потенціалу та функції просторового опору (витрат часу та коштів на переміщення).

3. **Розподіл потоків (завантаження мережі).** Вихідні матриці кореспонденцій завантажувалися в мережу. Оптимальні маршрути руху обчислювалися за критерієм мінімізації узагальненої функції витрат, де основним інтеграційним показником виступали витрати часу. Враховуючи падіння швидкості потоку за умови зростання щільності руху, модель реалізує ітераційний цикл перерозподілу, що коригує маршрути та матриці зв'язків до досягнення стану математичної рівноваги.

4. **Калібрування та валідація.** Для узгодження розрахункових параметрів моделі базового року з реальними показниками інтенсивності проведено процедуру калібрування. Контрольним індикатором збіжності моделі виступала величина відносної помилки між натурними замірами на ключових ділянках та модельними значеннями. Математичну оцінку адекватності виконано із залученням критерію (модифікована статистика χ^2 -квадрат), яка нівелює масштабні споріднення при низьких та високих обсягах інтенсивності [14].

Модель вважається валідною та адекватною за умови, що в 85% контрольних точок відхилення розрахункових потоків від фактичних даних натурних спостережень не перевищує порогу 15%. Достовірність фінального базового сценарію підтверджено шляхом порівняльного аналізу розподілу довжин поїздок та сумарного обсягу кореспонденцій, після чого верифікована модель завантаження мережі стала основою для запуску екологічного аналізу емісії та паливних витрат за допомогою інтегрованого інструментарію COPERT.

2.7. Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано вибір розрахункової логіки програмного комплексу COPERT як ефективного інструменту екологічного моніторингу на автомобільному транспорті. Встановлено, що інтегрований у модель математичний апарат дозволяє трансформувати макроекономічні та кінематичні дескриптори руху (інтенсивність, швидкість, рівень обслуговування) у диференційовані показники емісії шкідливих речовин та паливних витрат. Еволюція методики від класичного паливного балансу до складання енергетичного балансу забезпечує високу точність розрахунків з урахуванням сучасних багатокomпонентних палив із біодобавками (E5, B7).

2. Формалізовано послідовність налаштування та запуску екологічного макромодуля, яка охоплює етапи детального конструювання унікальних флотів (*Fleet Compositions*) відповідно до структури реального автопарку, а також розрахунок у статичному (добовому) режимі. Обґрунтовано вимоги до параметризації користувацьких транспортних страт: доведено необхідність двовимірної дискретизації емісійних коефіцієнтів для важкої техніки, а також визначено межі розрахунку масових витрат палива, які є коректними лише для монопаливних систем.

3. Систематизовано підходи до оцінювання додаткового екологічного навантаження у фазі прогріву двигунів внутрішнього згоряння. На основі порівняльного аналізу полігонального та маршрутного методів встановлено, що маршрутний алгоритм із використанням функції затухання на перших кілометрах пробігу забезпечує адекватне математичне наближення обсягів емісії холодного пуску до умов реального руху без потреби в ресурсомісткому динамічному перерозподілі потоків. При цьому підтверджено інженерну логіку відсутності надлишкових пускових викидів для регулярного пасажирського, що виконує роботу в нетепловому режимі суто з прогрітими енергетичними установками.

4. Розроблено та верифіковано комплексну методику експериментального дослідження параметрів руху та екологічного моніторингу автотранспорту для урбанізованого простору міста Кривий Ріг. Створена макромодель, що базується на просторовому розподілі 238 транспортних зон, пройшла повний чотириступеневий цикл налаштування (генерація, розподіл, завантаження мережі та калібрування). Високий ступінь відповідності моделі реальним умовам підтверджено за допомогою модифікованої статистики хі-квадрат відхилення розрахункових потоків від фактичних даних натурних спостережень не перевищує нормативного порогу 15%, що доводить адекватність базового сценарію та легітимність отриманих на його основі екологічних метрик.

РОЗДІЛ 3. ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ МІСЬКИХ ТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Гістограми потоків викидів відпрацьованих газів по вулично-дорожній мережі відображають диференційоване навантаження на різних ділянках мережі міста Кривий Ріг. Ширина та колір смуг візуалізують обсяг викидів від найменшого до найбільшого значення.

На ділянці дороги убік мікрорайону Інгулець викиди вуглекислого газу оцінюються на рівні 355 кг/доба, чадного газу – 2 кг/доба, абсолютна маса спаленого палива на ділянці –114 – 111 кг/доба, оксиду азоту – 2 кг/доба, що свідчить про стабільний швидкісний режим без надмірних заторів, твердих частинок/сажі – 47 г/доба (рис.3.1).

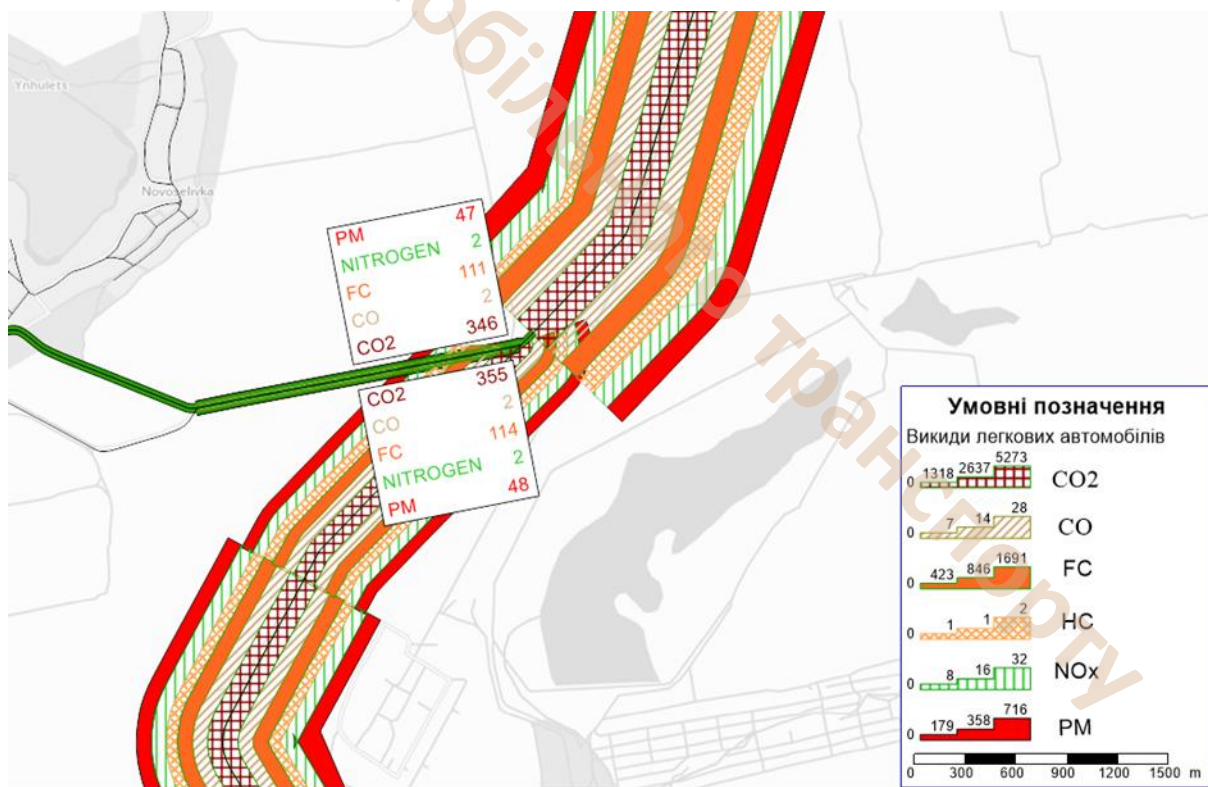


Рис.3.1. Розподіл викидів шкідливих речовин від потоків ЛА на ділянки дороги Кривий Ріг -Інгулець

Напрямки руху по трасі Н-23 (Нікопольське шосе) показані на рис.3.2.

Викиди діоксиду вуглецю – 1064 кг/доба в одному напрямку та 1090 кг/доба у зворотному. Стабільні показники понад 1 тону на добу вказують на те, що ділянка із високим сумарним пробігом транспортних засобів. Витрата палива фіксується на рівні 341 та 350 кг/доба в одному напрямку. Викиди оксиду азоту – 6- 7 кг /доба для кожного із напрямків, чадного газу – 6 кг /доба в одному напрямку, твердих дрібнодисперсних частинок – 145 г /доба.

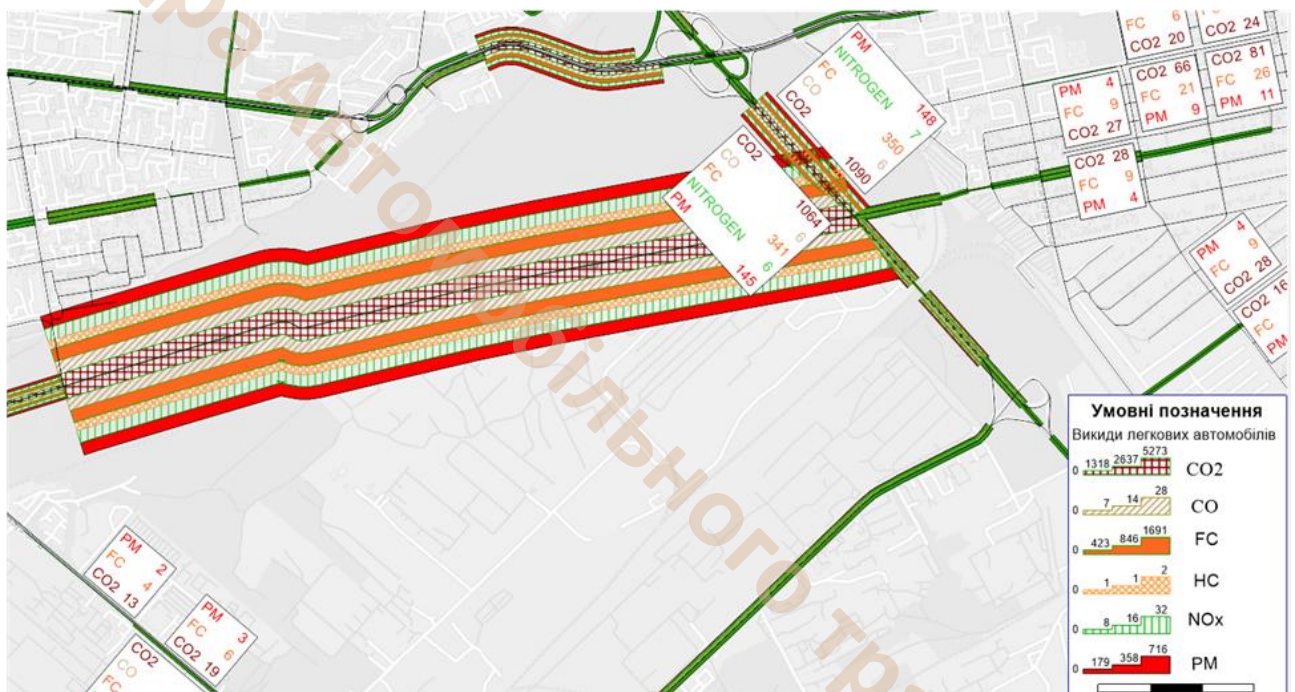


Рис.3.2. Розподіл викидів шкідливих речовин від потоків ЛА на ділянки дороги Н-23 (Нікопольське шосе)

Викиди діоксиду вуглецю більше ніж на попередніх напрямках – 2290 та 2213 кг/доба. Витрата палива фіксується на рівні 710 та 734 кг/доба в одному напрямку. Викиди оксиду азоту –13 -14 кг /доба для кожного із напрямків, чадного газу –12 кг /доба в одному напрямку, твердих дрібнодисперсних частинок –301 – 311 г /доба.



Рис.3.3. Розподіл викидів шкідливих речовин від потоків ЛА на ділянки дороги Н-23 (на Кропивницький)

Висока концентрація екологічного навантаження спостерігається вздовж діаметральних магістралей, наприклад, на об'їзній дорозі з ЦГЗК (рис. 3.4), викиди діоксиду вуглецю – 4856 кг /доба в одному напрямку руху.

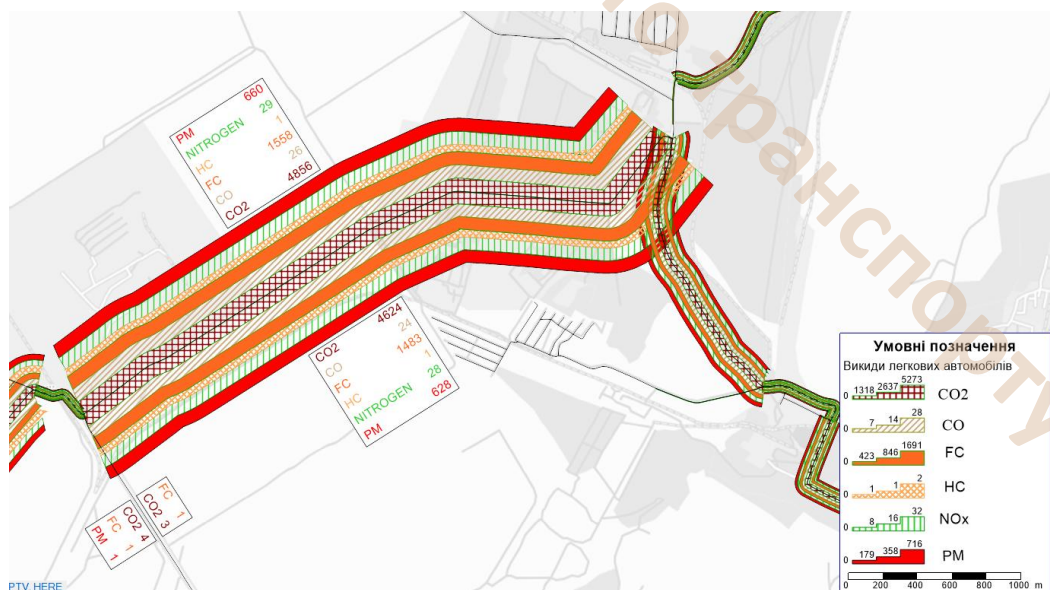


Рис.3.4. Розподіл викидів шкідливих речовин від ЛА на об'їзній дорозі з ЦГЗК

Всередині міської забудови одним із більш екологічно напружених напрямків є ділянка Об'їзної дороги біля мікрорайонів Східний -1,2, 3 (рис. 3.5), яка характеризується викидами діоксиду вуглецю на рівні 5273 кг /доба в одному напрямку руху, витратою палива – 1691 кг /доба.

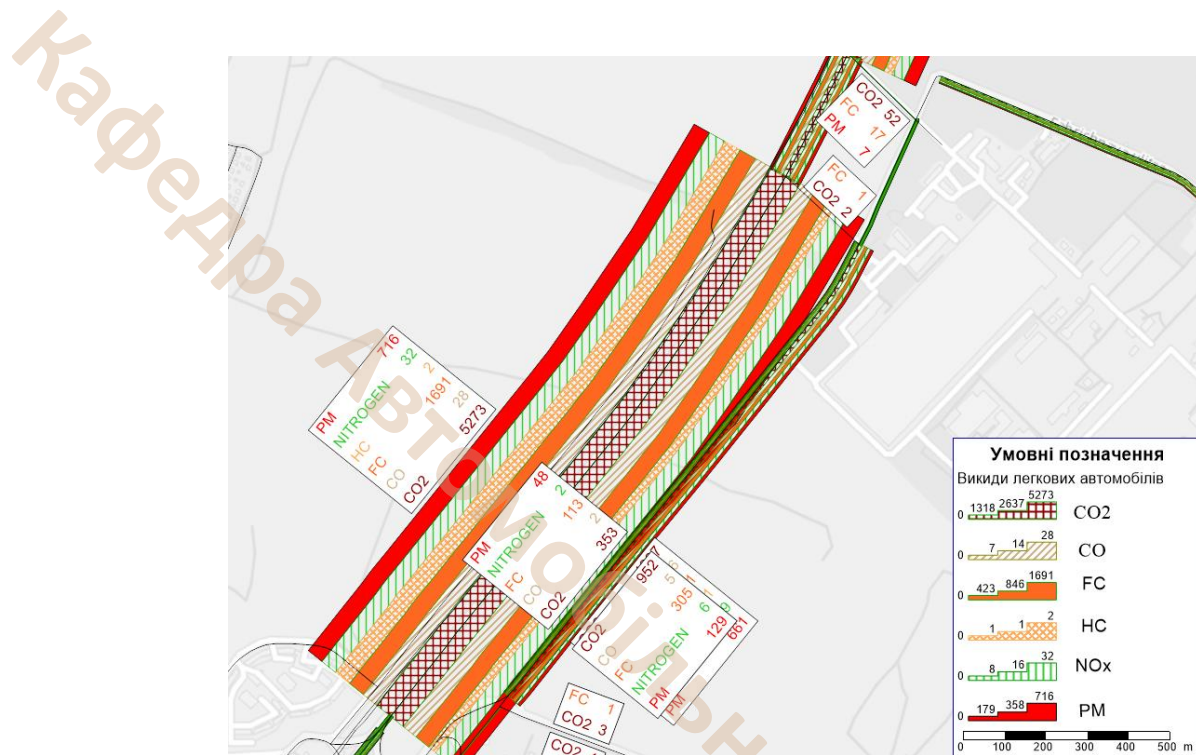


Рис.3.5. Розподіл викидів шкідливих речовин від ЛА на об'їзній дорозі поряд з мкрн. Східний-1,2,3.

Лінійно-протяжна структура міста зумовлює концентрацію екологічного навантаження вздовж головних діаметральних магістралей. На загальній гістограмі (рис.3.6) чітко видно «червоні коридори», де акумулюється понад 80% усього міського обсягу твердих частинок та парникових газів.

Нерівномірність викидів за напрямками підтверджує чутливість обраної моделі COPERT Tier 3 до геометрії ВДМ (класів градієнтів, які закладено в межах від -6% до +6%). При русі на підйом витрата палива та емісія зростають експоненціально.

Локальні зони екологічного дисбалансу зосереджені в місцях примикання бічних конекторів до магістралей (зони розгону – Об'їзна дорога та зміни швидкісного режиму). Співвідношення чадного газу до оксидів азоту показує, що на перегонах переважають «гарячі» викиди стабільного руху, тоді як у вузлових зонах суттєву частку додають перехідні режими (гальмування/розгін) та ефекти холодного пуску двигунів, що підтверджує логіку маршрутного методу згасання емісії на перших кілометрах пробігу.

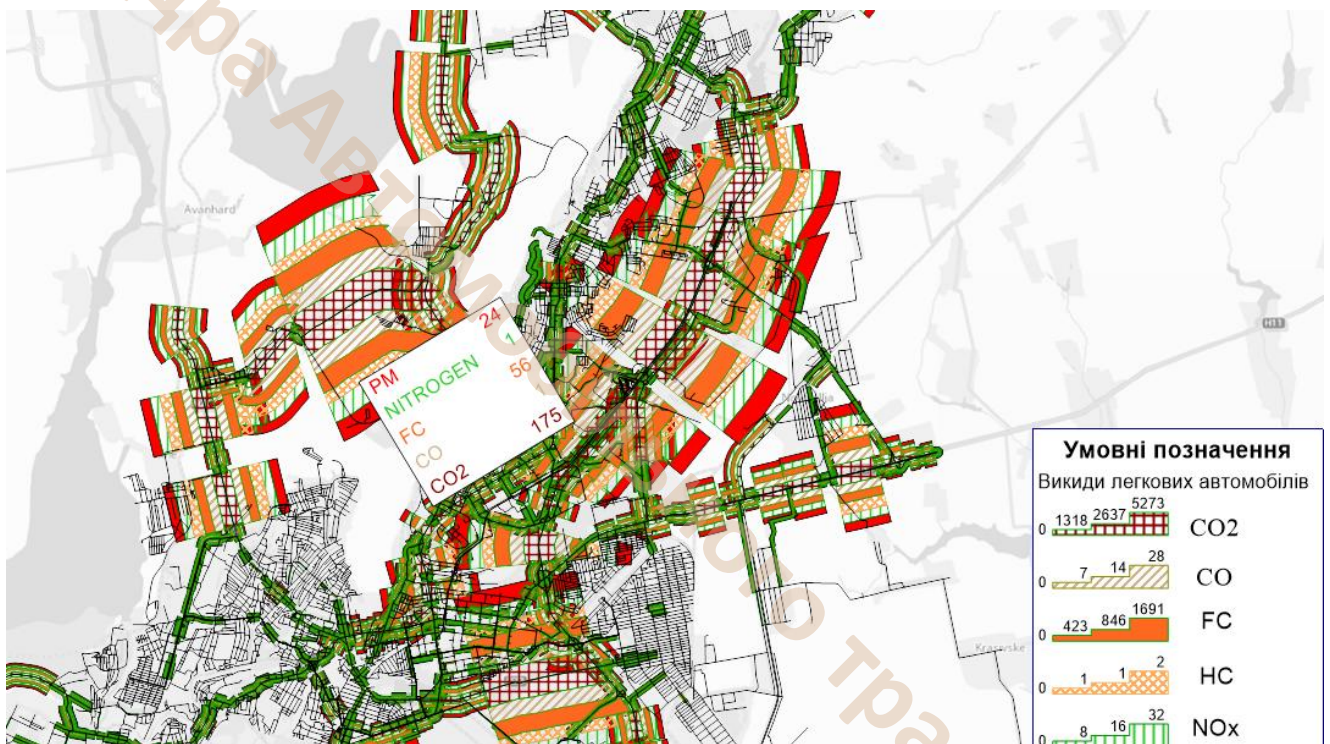


Рис.3.6. Гістограма розподілу викидів шкідливих речовин від ЛА.

Аналіз просторового розподілу екологічних індикаторів (рис.3.6) на гістограмах виявляє характерну поведінкову закономірність у розподілі транспортних потоків міської мережі.

Зокрема, індивідуальний транспорт (легкові автомобілі) у спробах уникнути проїзду перевантаженими центральними магістралями та вузловими перехрестями починає активно використовувати периферійні та об'їзні автодороги. Така зміна

маршрутів та переорієнтація шарів попиту призводить до специфічних наслідків: намагаючись об'їхати центральну частину міста, легкові автомобілі долають значно більші відстані. Оскільки в основі розрахункового апарату методології COPERT Tier 3 ключовим математичним дескриптором є саме сумарний поланковий пробіг, збільшення протяжності траєкторій руху автоматично масштабує загальні обсяги емісії.

Трансформація картограм показує, що значні обсяги паливних витрат, маси забруднюючих речовин та твердих частинок зміщуються з міського центру на об'їзні та напівпериферійні відрізки мережі, формуючи там нові зони підвищеного екологічного навантаження.

Позацентральної траси часто характеризуються складнішим поперечним профілем та наявністю значних похилів (градієнтів) (як траса Н-23 на Кропивницький). При перерозподілі легкового потоку на такі ділянки рух у режимі «на підйом» провокує додаткове надлишкове спалювання палива, що наочно підтверджується різким розширенням колірних смуг емісії на відповідних об'їзних лінках.

Таким чином, суб'єктивне прагнення водіїв індивідуального транспорту мінімізувати затримки в центрі міста через використання об'їзних маршрутів у підсумку призводить до децентралізації екологічного забруднення та сумарного збільшення валових викидів у межах усього досліджуваного транспортного графа.

Дослідження просторових закономірностей перерозподілу потоків дозволяє стверджувати, що описана тенденція децентралізації та винесення емісії на периферійні дуги є цілком характерною і для легких вантажних автомобілів, які забезпечують логістику та обслуговують розгалужену мережу точок роздрібної торгівлі й сфери послуг у центральній частині міста рис.3.7 – рис.3.9.

У контексті функціонування комерційного автопарку малої вантажопідйомності дана ситуація має свою специфіку.

Водії легких вантажних автомобілів, що здійснюють регулярне постачання товарів, критично залежать від часу перебування в дорозі. Розраховуючи маршрути в PTV Visum за критерієм мінімізації узагальненої функції витрат часу, алгоритм перерозподілу спрямовує комерційні шари попиту в об'їзд завантаженого центрального ядра. Як наслідок, легкий вантажний транспорт масово використовує напівпериферійні та кільцеві маршрути як транзитні підходи до моменту безпосереднього звернення (з'їзду) до цільової точки продажу.

Маневрування периферійними дугами суттєво збільшує просторовий пробіг комерційних автомобілів. Оскільки для категорії LCV емісійні коефіцієнти в COPERT диференційовані за кожним швидкісним класом, подовження траєкторій руху на об'їзних дорогах провокує різке зростання сумарної маси викидів чадного газу, оксидів азоту та діоксиду вуглецю на позацентральных лінках (рис.3.7).

На відміну від індивідуального легкового транспорту, легкі вантажні автомобілі в межах об'їзних маршрутів частіше стикаються з потребою маневрування на другорядних примиканнях та вузлах, що веде до додаткової нестабільності швидкісного режиму, що відображається на гістограмах у вигляді розширення пластів (ланок) емісії твердих частинок (108 г /доба) за рахунок підвищеного зносу гальмівних накладок та шин під час частих циклів гальмування-розгону.

Комерційні автомобілі, що обслуговують торговельні об'єкти, мають дискретний характер руху з частими зупинками для розвантаження. При їхньому виїзді на об'їзні магістралі після тривалої стоянки активується функція надлишкових викидів холодного пуску. Маршрутний метод оцінювання в межах перших кілометрів пробігу фіксує суттєвий сплеск емісії, який накладається на вже завантажені транзитним потоком периферійні відрізки.

Незважаючи на виражену тенденцію децентралізації потоків та винесення логістичних маршрутів на периферійні дуги, центральні автодороги міста продовжують акумулювати значні обсяги екологічного навантаження від

комерційного транспорту. Яскравим прикладом цього є вулиця Володимира Великого, яка безпосередньо зв'язує великі торгово-офісні зони та житлові масиви (рис.3.9). На відміну від протяжних швидкісних перегонів об'їзних доріг, рух легкого комерційного транспорту по вулиці Володимира Великого відбувається в умовах щільного міського регулювання (наявність світлофорних об'єктів, пішохідних переходів, зупинок громадського транспорту). Постійна зміна режимів руху (цикли «розгін — гальмування») призводить до того, що питомі викиди оксиду вуглецю та неметанових вуглеводнів на один кілометр пробігу тут є вищими, ніж на позацентральної ділянках мережі.

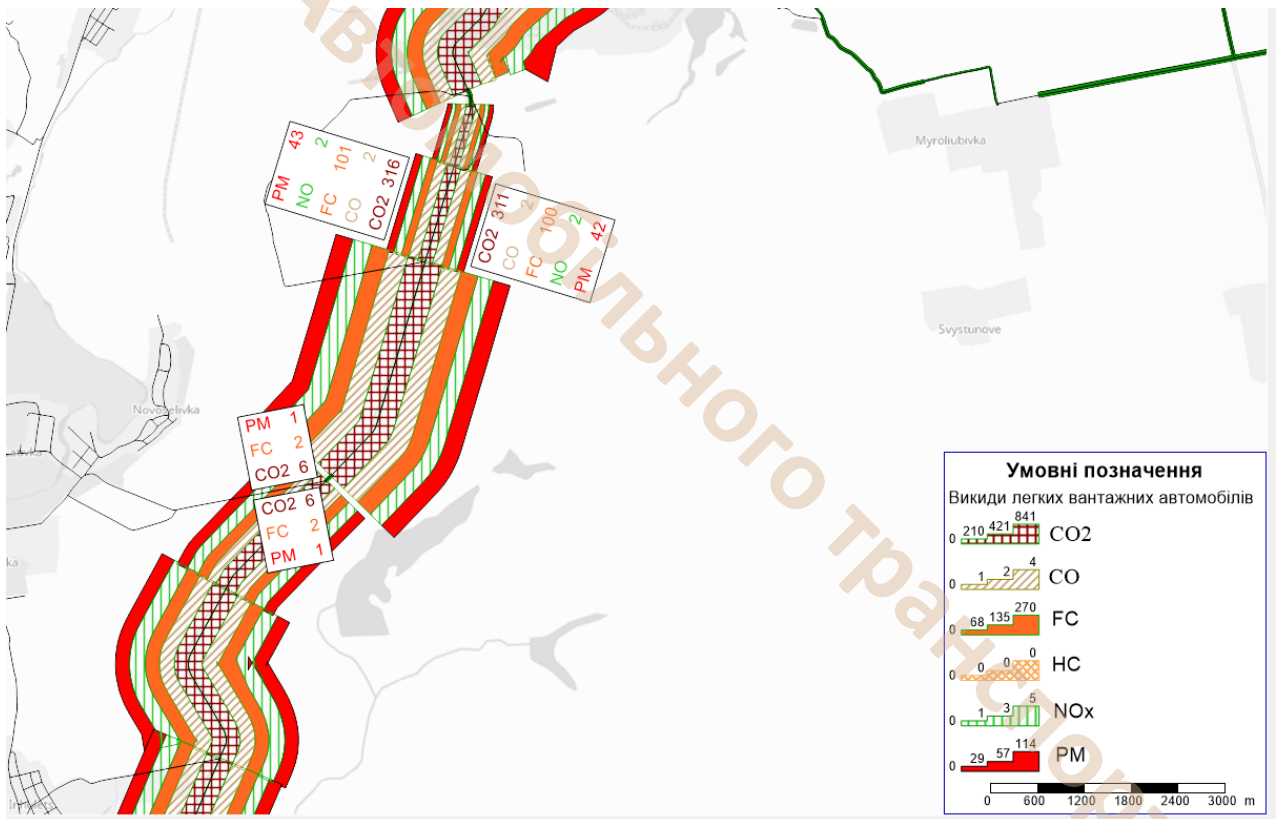


Рис.3.7. Ділянка розподілу викидів шкідливих речовин від легких вантажних автомобілів.

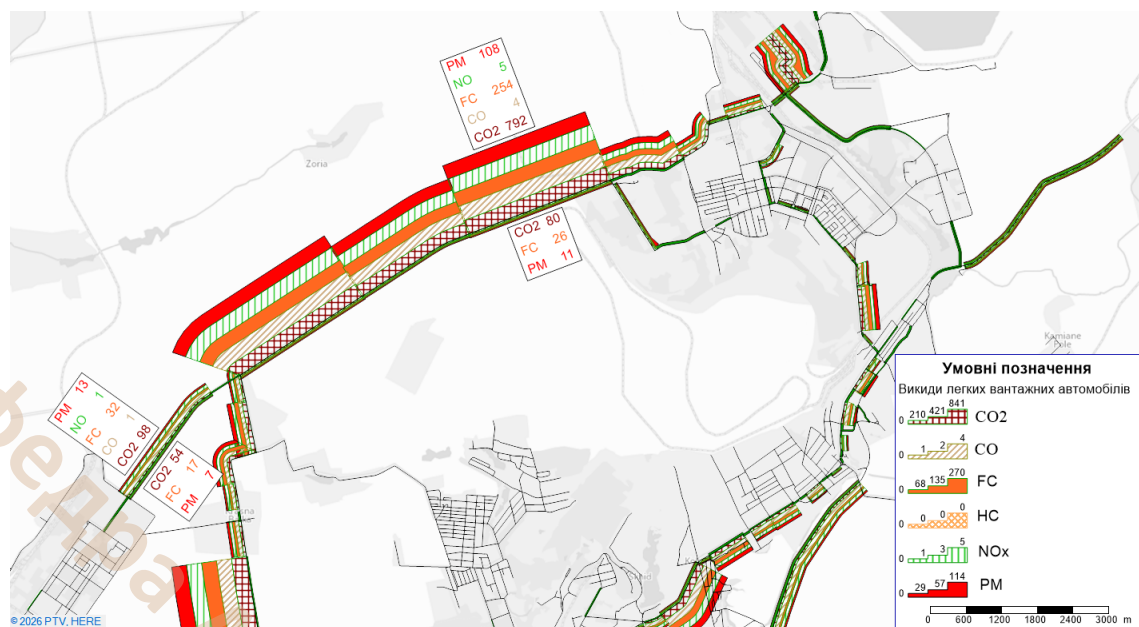


Рис.3.8. Ділянка розподілу викидів шкідливих речовин від легких вантажних автомобілів (Тернівський район).

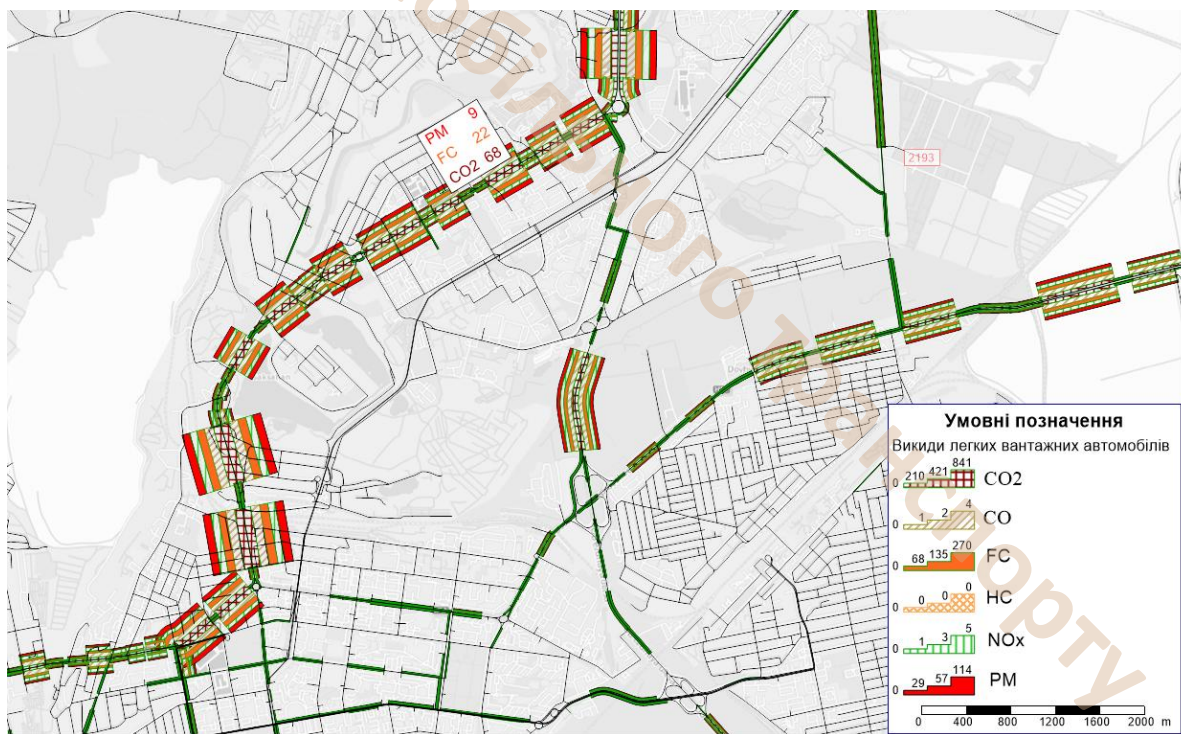


Рис. 3.9. Розподіл викидів шкідливих речовин від легких вантажних автомобілів (вул. В. Великого, Дніпровське шосе).

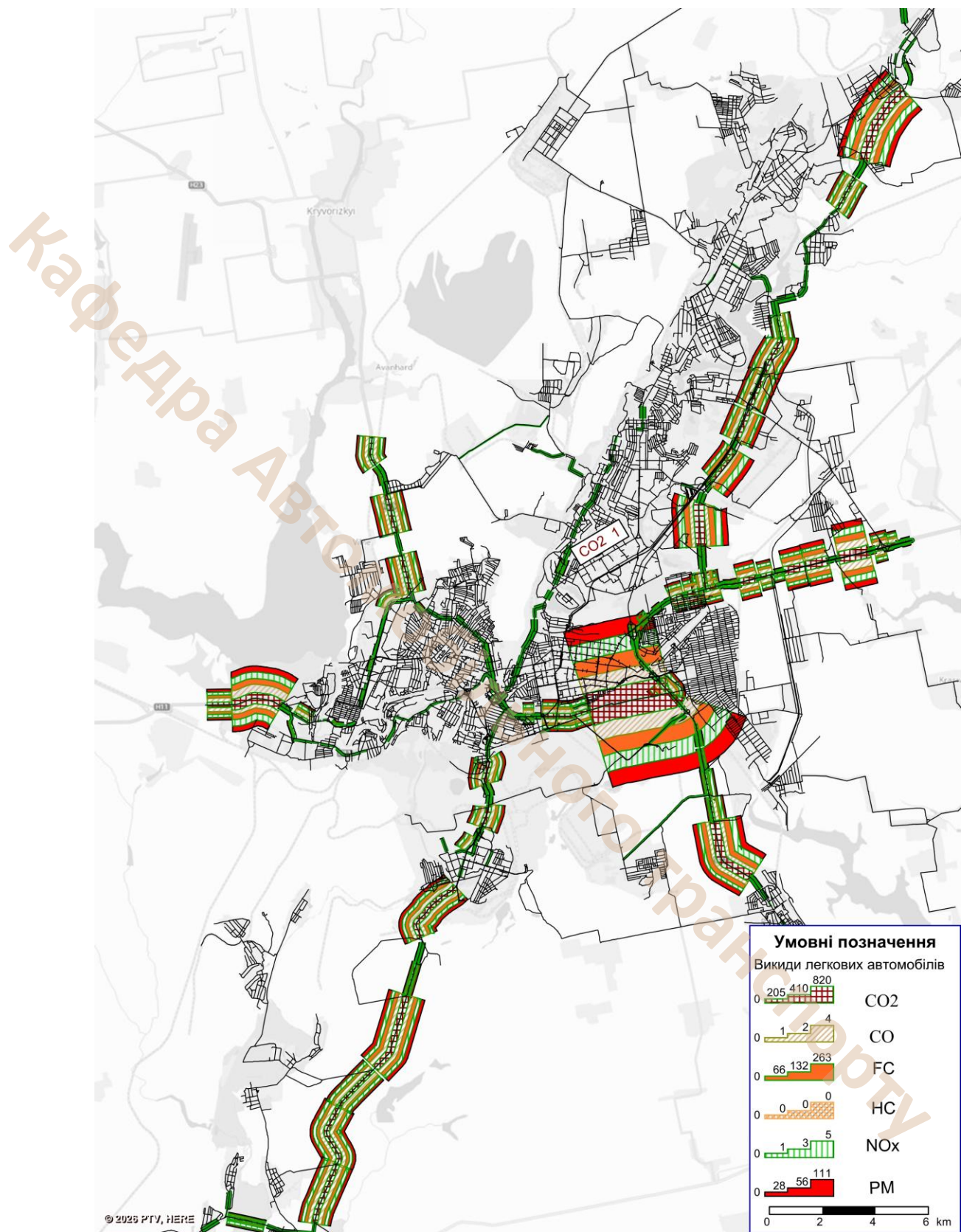


Рис.3.10. Розподіл викидів шкідливих речовин від важких вантажних автомобілів

Для важких вантажних автомобілів розподіл викидів концентрується навколо декількох ділянок вулично-дорожньої мережі.

Нікопольське шосе- 820 кг/доба для двооксиду вуглецю (один напрямок), 263 кг /доба – витрата палива, 106 -111 г/доба – викиди твердих часток, Об'їзна дорога (по всій довжині) - 277 кг/доба для двооксиду вуглецю, 89 кг/доба – витрата палива, 36 -38 г/доба – викиди твердих часток.

Заборона проїзду вантажних автомобілів вантажопідйомністю більше 3,5 т мінімізує ризики забруднення від руху саме даного типу автомобілів центральної частини міста (рис.3.10).

Лінійно-протяжна топологія вулично-дорожньої мережі (ВДМ) міста Кривий Ріг виступає першопричиною критичної просторової концентрації екологічного навантаження. Загальна картина моделювання чітко ідентифікує так звані «червоні коридори» вздовж головних діаметральних магістралей, де акумулюється основна частина усього міського обсягу твердих дисперсних частинок та парникових газів. Це свідчить про надмірну екологічну вразливість моноцентричних транзитних осей міста, які виконують роль системних замикаючих лінків для всіх категорій транспорту.

Суб'єктивна поведінкова закономірність водіїв індивідуального легкового транспорту, які намагаються уникнути перевантаженого центрального ядра міста, створює системний негативний екологічний ефект. Переорієнтація шарів попиту на периферійні та об'їзні автодороги призводить до експоненціального масштабування пробігу: подовження траєкторій руху автоматично збільшує валовий викид забруднюючих речовин в цілому по місту, екологічний тиск не зникає, а просто зміщується на позацентричні відрізки, формуючи там нові зони довготривалого приземного забруднення.

На відміну від рівнинного центру, позацентральної траси (наприклад, траса Н-23 на Кропивницький) мають складний поздовжній профіль із градієнтами від -6% до +6%. Рух легкового потоку в режимі «на підйом» провокує різке зростання

витрати палива та супутніх емісій, що візуально підтверджується екстремальним розширенням екологічних смуг на картограмах (досягаючи 4856 кг/доба на об'їзній ЦГЗК та пікових 5273 кг/доба в районі мікрорайонів Східний-1, 2, 3).

Тенденція маневрування периферійними кільцевими маршрутами повністю екстраполюється і на легкі вантажні автомобілі, що обслуговують міську торговельну мережу. Проте для комерційного автопарку дана ситуація ускладнюється низкою специфічних факторів. Для категорії LCV коефіцієнти COPERT жорстко прив'язані до швидкісних класів. Додаткове маневрування на другорядних вузлах об'їзних доріг викликає нестабільність швидкості, що викликає суттєве зростання викидів парникових газів та приземної концентрації сажі (до 108 г/доба) твердих частинок суто за рахунок механічного зносу гальм та шин у циклах розгін-гальмування. Через дискретний характер доставки (частий простій під розвантаженням) виїзд комерційних машин на об'їзні маршрути супроводжується роботою непрогрітих двигунів. Надлишкова емісія фази холодного старту у межах перших кілометрів пробігу накладається на вже завантажені транзитні периферійні відрізки, створюючи зони локального екологічного дисбалансу в місцях примикання бічних примикань.

Незважаючи на масовий відтік транзиту на об'їзні шляхи, центральні магістралі міста (зокрема, вулиця Володимира Великого) залишаються зонами постійного екологічного напруження. Це зумовлено непереборним фактором генерації попиту (необхідність фінальної доставки товарів у центр) та жорстким міським регулюванням руху (світлофори із фіксованим циклом, перехрестя, зупинки). Постійна робота легких вантажних автомобілів у перехідних режимах зумовлює те, що питомі викиди чадного газу та неметанових вуглеводнів на 1 км пробігу тут залишаються значно вищими, ніж на швидкісних позацентральных ділянках.

Для важких вантажних автомобілів (масою понад 3,5 т) характерна чітка географічна локалізація екологічного сліду, зосереджена виключно навколо ізольованих промислово-транзитних секторів: Нікопольське шосе (траса Н-23), яке

генерує 820 кг/доба діоксиду вуглецю, 263 кг/доба витрати палива та до 111 г/доба твердих часток в одному напрямку. Об'їзна дорога демонструє рівномірне, але значне за довжиною навантаження.

Впроваджена адміністративна заборона на рух вантажівок масою понад 3,5 т у центральній частині міста повністю виправдовує себе як інженерне та управлінське рішення. Вона дозволяє частково ізолювати житлові квартали та центральні рекреаційні зони від найбільш токсичного та грубодисперсного компонента викидів важких дизельних двигунів, зміщуючи цей екологічний удар на спеціалізовані позаміські та промислові комунікаційні коридори.

ВИСНОВКИ

У роботі на прикладі міста Кривий Ріг обґрунтовано ефективність розрахункового комплексу COPERT (Tier 3), інтегрованого у макромодель в програмному забезпеченні *PTV Visum*, який через побудову енергетичного балансу забезпечує високу точність оцінки багатокomпонентних палив. Доведено перевагу маршрутного методу оцінки емісії холодного пуску (в межах перших кілометрів пробігу), що дає адекватне математичне наближення без ресурсомісткого динамічного перерозподілу потоків.

На відміну від існуючих досліджень [7, 8] впливу автотранспорту на екологічну безпеку Кривого Рогу:

1. Доведено, що лінійно-протяжна топологія ВДМ м. Кривий Ріг є першопричиною формування «червоних коридорів» екологічного навантаження вздовж головних магістралей, де акумулюється понад 80% загальноміських викидів твердих частинок та парникових газів.

2. Виявлено системний екологічний парадокс поведінки водіїв: прагнення індивідуального та легкого комерційного транспорту об'їхати перевантажене центральне ядро призводить до збільшення просторового пробігу та зміщення емісії на периферійні дуги із складним профілем. Це провокує локальні сплески емісії двооксиду вуглецю до 4856 кг/доба (об'їзна ЦГЗК) та 5273 кг/доба (мкрн. Східний-1, 2, 3).

3. Встановлено особливості забруднення від комерційного парку: для легких вантажних автомобілів маневрування на об'їзних шляхах та дискретність доставки збільшують нестабільність швидкості та активують фазу «холодного пуску», що підвищує викиди сажі до 108 г/доба суто через механічний знос шин і гальм у циклах «розгін-гальмування».

4. У центрі (вул. Володимира Великого) через фіксовані цикли світлофорів і щільне регулювання питомі викиди чадного газу та неметанових вуглеводнів на 1 км пробігу є суттєво вищими, ніж на швидкісних об'їзних лінках.

4. Для важкого транспорту (понад 3,5 т): екологічний слід чітко локалізований на промзонах (Нікопольське шосе генерує 820 кг/доба двооксиду вуглецю та 111 г/доба твердих часток. Адміністративна заборона їхнього в'їзду в центр повністю виправдовує себе, частково ізолюючи житлову забудову від токсичних викидів дизелів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Звіт про стратегічну екологічну оцінку. Нове будівництво офісної будівлі на вул. Лютчиків, 16 та реконструкція існуючого комплексу. – ТОВ НДП«ЕКОЕКСПЕРТ». – 81 с.
2. Звіт про стратегічну екологічну оцінку документа державного планування (ДДП) «Міська програма вирішення екологічних проблем Кривбасу та поліпшення стану навколишнього природного середовища на 2016-2025 роки» (внесення змін). – Кривий Ріг, 2025. – 81 с.
3. Куліковська О. Є. Результати використання інформації екомоніторингу Кривбасу для картографування стану довкілля міського середовища / О. Є. Куліковська, О. Ф. Ковалишин, Р. М. Ступень, І. Ф. Рій. Вісник Криворізького національного університету. 2023. Вип. 57. С. 22 - 31. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vktu_2023_57_7
4. Ричак Н. Л. Математичний аналіз забруднення повітря на території України з використанням даних з відкритих джерел / Н. Л. Ричак, Н. М. Кізілова, В. А. Майструк, А. С. Макаренко, О. С. Прогнімак. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2021. № 4. С. 20-31. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvpi_2021_4_4
5. Грищенко А. В. Рівень забруднення автотранспортом атмосферного повітря м. Кривий Ріг : кваліфікаційна робота на здобуття ступеня бакалавра (або магістра) : спец. 101 «Екологія» / Криворізький державний педагогічний університет, Природничий факультет, Кафедра ботаніки та екології ; наук. керівн. Е. О. Євтушенко. Кривий Ріг, 2022. 37 с.
6. Криворучко Д. Д. Дослідження інтенсивності забруднення атмосферного повітря викидами вихлопних газів автотранспорту в умовах міста Кривий Ріг: кваліфікаційна магістерська робота: спец. 101 «Екологія» / Криворізький національний університет, Кафедра геології та екології ; наук. керівн. С. М. Панова. Кривий Ріг, 2024. 50 с.

7. Halaktionov, M., & Hanoshenko, O. (2022). Analysis of atmospheric air in the city of Kryvyi Rih and the contribution of motor vehicles to the pollution of the city. *Academic Journal. Industrial Machine, Building Civil Engineering*, 1(58), 149-154. <https://doi.org/10.26906/znp.2022.58.309>
8. Галактіонов М., Бредун В. Інфраструктурні особливості міста Кривий Ріг як додатковий фактор впливу автотранспорту на навколишнє середовище. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 4 (339). С. 310–315. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-49>.
9. У Кривому Розі виявили колосальне забруднення повітря вздовж автодоріг. Електронне джерело: <https://ecopolitic.com.ua/ua/news/u-krivomu-rozi-viyavili-kolosalne-zabrudnennya-povitrya-vzdovzh-avtodorog/>
10. Дослідження та шляхи поліпшення екомоніторингу в місті Кривий Ріг / І. В. Салій, Н. О. Риженко, В. Й. Засельський, Д. В. Пополов. Екологічні науки: науково-практичний журнал / голов. ред. О. І. Бондар ; М-во захисту довкілля та природних ресурсів України, ДЕА. Київ : Видавничий дім «Гельветика», 2020. № 5 (32). С. 16–22.
11. Якість повітря у місті Кривий Ріг. Електронне джерело: <https://www.saveecobot.com/maps/kryvyi-rih>
12. Інформація про стан якості атмосферного повітря у м. Кривий Ріг. Електронне джерело: https://air.kr.gov.ua/?fbclid=IwdGRjcAR3yGZjbGNrBHfIV2V4dG4DYWVtAjExAHNydGMGYXBwX2lkDDM1MDY4NTUzMTcyOAABHgtkqmmVHjcBvyheOIFbKvKeY-dcSrigbTkPQEBouFyPLg7N5VW34ar57Z_aem_4i5slNiRXbLoGz3Y9WtpQ
13. <https://copert.emisia.com/>
14. <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-visum>