

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра геоінженерії
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК 502/504

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Анатолій КРЮЧКОВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2020 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
зі спеціальності 101 Екологія**
(код та назва спеціальності)

на тему: «Прогнозування впливу автомобільного транспорту в умовах
"міських каньйонів" та "дворових колодязів"»

Студент групи ОЗ-91мп Крушевський Є. А.
(шифр групи) (прізвище та ініціали) _____
(підпис)

Науковий керівник Кофанова О. В., д. п. н., к.х.н., професор
(прізвище та ініціали, науковий ступінь, вчене звання, посада) _____
(підпис)

Консультант Стартап-проекту Шевчук Н. А., к. т. н., доцент
(назва розділу) (прізвище та ініціали, науковий ступінь, вчене звання) _____
(підпис)

Рецензент _____
(прізвище та ініціали, науковий ступінь, вчене звання) _____
(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повне найменування інституту, факультету)

Кафедра геоінженерії
(повна назва кафедри)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) – 101 Екологія («Інженерна екологія та ресурсозбереження»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій КРЮЧКОВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2020 р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію**

студенту _____ Крушевському Єгору Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по-батькові)

1. Тема дисертації «Прогнозування впливу автомобільного транспорту в умовах "міських каньйонів" та "дворових колодязів"»,
науковий керівник дисертації Кофанова О. В., д. п. н., к.х.н., професор,
(прізвище, ім'я, по-батькові, науковий ступінь, вчене звання, посада)

затверджені наказом по університету від « 03 » листопада 2020 р. №3199-с

2. Дата подання студентом дисертації « 21 » грудня 2020 р.
3. Об'єкт дослідження – забруднення дворів «колодязів» та міських каньйонів інгредієнтами викидів відпрацьованих газів автотранспортних засобів.
4. Предмет дослідження – розсіювання чадного газу, оксидів нітрогену та дрібнодисперсного пилу у дворах колодязного типу та міських каньйонах.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 1. Здійснити огляд літературних джерел та наукових напрацювань за темою дослідження.
 2. Розглянути ряд моделей для вирішення проблем прогнозування і проаналізувати досвід їх використання.
 3. Зібрати експериментальні дані з трьох вулиць міста Києва.
 4. На основі зібраних даних створити поля дисперсії забруднювачів та скласти карти концентрацій речовин біля вуличних каньйонів.

5. Розробити стартап-проект.
6. Орієнтовний перелік графічного матеріалу: 13 слайдів презентації.
7. Орієнтовний перелік публікацій: в XII науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина» на тему «Забруднення дворових територій через «колодязну» міську забудову».
8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали, посада	Дата, підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Нормоконтроль	Репін М.В., к.т.н., асистент		
Стартап-проект	Шевчук Н.А., к.т.н., доцент		

9. Дата видачі завдання: «01» вересня 2020 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Вибір і затвердження теми.	01.09.20-07.09.20	виконано
2.	Підбір і ознайомлення з літературою	08.09.20-28.09.20	виконано
3.	Складання плану, розробка індивідуального завдання	29.09.20-12.10.20	Виконано
4.	Поглиблене вивчення літературних джерел і написання теоретичної частини.	13.10.20-09.11.20	Виконано
5.	Збір і аналітична обробка статистичного матеріалу з теми дослідження	10.11.20-23.11.20	Виконано
6.	Написання дисертації та її оформлення	24.11.20-10.12.20	Виконано
7.	Подання роботи в ДЕК та її захист	11.12.20-22.12.20	Виконано

Студент

(підпис)

Єгор Крушевський
(ім'я, прізвище)

Науковий керівник

(підпис)

Олена Кофанова
(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Обсяг магістерської дисертації складає 78 сторінок, вона містить 22 ілюстрації, 14 таблиць, 31 джерело інформації за переліком посилань.

Актуальність теми дослідження. В умовах швидкої урбанізації все більше зростає частка людей, які проживають в місті. Міська забудова створює свій мікроклімат та свою унікальну циркуляцію повітряних мас. Автомобільний транспорт це найбільший забруднювач міста, число якого з роками все більшає, особливо в теперішніх умовах, коли він став доступніше. Тому його вплив на здоров'я людини стає все відчутніше. Міські каньйони складають основну функціональну одиницю міста. Вивчення впливу міських каньйонів та дворів «колодязного» типу на екологічну ситуацію в умовах щільної забудови міста є надзвичайно актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація виконана на кафедрі геоінженерії в Інституті енергозбереження та енергоменеджменту та відповідає вимогам Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» №2697-VIII від 28.02.2019 (введення в дію відбудеться 01.01.2020 року) у сфері поводження з промисловими відходами.

Мета дослідження: змоделювати прогноз впливу автомобільного транспорту в умовах "міських каньйонів" та "дворових колодязів" на прикладі конкретних вулиць міста Києва.

Для досягнення встановленої мети дослідження необхідно розв'язати наступні завдання:

- здійснити огляд літературних джерел та наукових напрацювань за темою дослідження;
- розглянути ряд моделей для вирішення проблем прогнозування і проаналізувати досвід їх використання;
- зібрати експериментальні дані з трьох вулиць міста Києва;
- на основі зібраних даних створити поля дисперсії забруднювачів та

скласти карти концентрацій речовин біля вуличних каньйонів;

– створити стартап проект для проведення подібних розрахунків на комерційній основі, обґрунтувати його економічну доцільність.

Об’єкт дослідження: забруднення дворів «колодязів» та міських каньйонів інгредієнтами викидів відпрацьованих газів автотранспортних засобів.

Предмет дослідження: розсіювання чадного газу, оксидів нітрогену та дрібнодисперсного пилу у дворах колодязного типу та міських каньйонах.

Методи дослідження: системний аналіз літературних джерел, наукові експерименти – визначення значення концентрацій речовин та трафіку транспорту, розробка моделі на основі експериментальних даних, графічний – для наочного аналізу результатів експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів: розробка полів дисперсії та концентраційних карт для конкретних вулиць, створення висновків розсіювання чадного газу, нітроген оксиду та дрібнодисперсного пилу в умовах вуличних каньйонах та дворів колодязів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розумінні майбутнього стану середовища в умовах міських каньйонів та дворів колодязів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи викладено на XII Науково-технічній конференції магістрантів ІЕЕ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано статтю у збірнику матеріалів XII Науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: УРБОЕКОЛОГІЯ, ЕКОЛОГІЯ МІСТА, МІСЬКІ КАНЬЙОНИ, ДВОРИ КОЛОДЯЗІ, ВПЛИВ АВТОТРАНСПОРТУ.

ABSTRACT

The volume of the master's dissertation is contains 78 pages, 22 illustrations, 14 tables, 31 sources of information on the list of links.

Actuality of theme. In the context of rapid urbanization, the share of people living in the city is growing. Urban development creates its own microclimate and its own unique circulation of air masses. Road transport is the biggest polluter of the city, the number of which is growing over the years, especially in the current environment, when it has become more accessible. As a result, its impact on human health is becoming more pronounced. Urban canyons are the main functional unit of the city. Studying the impact of urban canyons and yards of the "well" type on the ecological situation in the conditions of dense urban development is an extremely important task.

Connection of work with scientific programs, plans, themes. Master's dissertation was completed at the Department of Engineering Ecology at the Institute of Energy Conservation and Energy Management and meets the requirements of the Law of Ukraine "On Basic Principles (Strategy) of State Environmental Policy of Ukraine until 2030" №2697-VIII from 28.02.2019 (implementation will take place 01.01.2020 year) in the field of industrial waste management.

The purpose of the study: to simulate the forecast of the impact of road transport in the conditions of "urban canyons" and "yard wells" on the example of specific streets of Kyiv.

To achieve the goal of the study it is necessary to solve the following tasks:

- to review literary sources and scientific developments on the research topic;
- consider a number of models for solving forecasting problems and analyze the experience of their use;
- collect experimental data from three streets of Kyiv;
- on the basis of the collected data to create a model for forecasting the impact of road transport in dense construction;

– to create a startup project for such calculations on a commercial basis, to justify its economic feasibility.

Object of research: pollution of yards of "wells" and city canyons with ingredients of exhaust gases of vehicles.

Subject of research: scattering of carbon monoxide, nitrogen oxides and fine dust in well-type yards and urban canyons..

Research methods: systematic analysis of literature sources, scientific experiments - determining the value of concentrations of substances and traffic, transport model development based on experimental data, graphical - for visual analysis of experimental results.

Scientific novelty of the obtained results: development of dispersion fields and concentration maps for specific streets, creation of conclusions of carbon monoxide, nitrogen oxide and fine dust scattering in the conditions of street canyons and well yards.

The practical significance of the obtained results is to understand the future state of the environment in the conditions of urban canyons and well yards.

Approbation of dissertation results. The main results of the work are presented at the XII Scientific and Technical Conference of IEE undergraduates (based on the results of dissertation research of undergraduates).

Publications. According to the results of the research, an article was published in the collection of materials of the XII Scientific and Technical Conference of IEE undergraduates.

KEY WORDS: URBAN ECOLOGY, CITY ECOLOGY, URBAN CANYONS, WELL YARDS, IMPACT OF MOTOR TRANSPORT.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	10
ВСТУП	11
1 ПРОБЛЕМИ ВУЛИЧНИХ КАНЬЙОНІВ ТА ЗАБУДОВ «КОЛОДЯЗНОГО» ТИПУ	13
1.1 Загальний опис вуличних каньйонів та забудов «колодязного» типу	13
1.2 Основні забруднювачі міських дворових територій та вплив на людину	16
1.3 Розсіювання поллютантів в умовах щільної та замкнутої забудови	20
Висновки до розділу 1	21
2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ В УМОВАХ ВУЛИЧНИХ КАНЬЙОНІВ	23
2.1 Моделювання забруднення атмосферного повітря	23
2.2 Прогнозування якості атмосферного повітря	25
2.3 Модель Land use regression для оцінки забрудненості повітря та його прогнозування.....	27
2.4 Модель обчислювальної динаміки рідини для вуличних каньйонів	32
2.4.1 Усереднений Рейнольдс Нав'є – Сток	33
2.4.2 Моделювання Large-Eddy	34
2.5 Модель дисперсії забруднення атмосферного повітря	34
Висновки до розділу 2	36
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУ РОЗСІЮВАННЯ ПОЛЮТАНТІВ ЗА БЕРЛЯНДОМ.....	38
3.1 Вплив забруднювачів на мешканців нижніх поверхів та їх накопичення в приміщеннях	38
3.1.1 Чадний газ	38
3.1.2 Оксиди нітрогену	40
3.1.3 Дрібнодисперсні частинки пилу	40
3.2 Факельна модель за Берляндом	41
3.3 Побудова моделей дисперсії для шкідливих речовин та карт концентрацій ШД	45

Висновки до розділу 3	58
4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА.....	59
4.1 Цілі та етапи реалізації стартап-проекту	59
4.2 Аналіз конкурентного середовища	60
4.3 Ключові види діяльності та ключові партнери	63
4.4 Фінансове обґрунтування стартап-проекту.....	65
4.5 Обґрунтування рівня рентабельності (прибутковості) інноваційної ідеї..	66
4.6 Вибір цільових груп і потенційних споживачів.....	67
4.7 Канали збуту	68
4.8 Бізнес модель проекту	69
4.9 Аналіз ризиків стартап проекту.....	70
4.10 Оцінка ефективності впорядження проекту та пропозиції інвестору	72
Висновки до розділу 4	73
ВИСНОВКИ.....	75
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	76

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

ЛОС – леткі органічні сполуки ;

ШД – шкідливі домішки;

рис. – рисунок;

табл. – таблиця;

LUR – Land use regression;

ГІС – геоінформаційні системи;

CFD – обчислювальна динаміка рідини;

RANS – усереднене за Рейнольдсом Нав'є – Стокса;

LES – симуляція великих вихорів;

RSM – модель стресу Рейнольдса;

ГДК – гранично допустима концентрація;

ГО – громадська організація;

ФОП – фізична особа підприємець;

ЄСВ – єдиний соціальний внесок;

SWOT - аббревіатура, що походить від англійських слів strengths (сильні сторони), weaknesses (слабкі сторони), opportunities (можливості), threats (загрози);

ЧДВ – чиста дисконтна вартість.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. В умовах швидкої урбанізації все більше зростає частка людей, які проживають в місті. Міська забудова створює свій мікроклімат та свою унікальну циркуляцію повітряних мас. Автомобільний транспорт це найбільший забруднювач міста, число якого з роками все більшає, особливо в теперішніх умовах, коли він став доступніше. Тому його вплив на здоров'я людини стає все відчутніше. Міські каньйони складають основну функціональну одиницю міста. Вивчення впливу міських каньйонів та дворів «колодязного» типу на екологічну ситуацію в умовах щільної забудови міста є надзвичайно актуальною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Магістерська дисертація виконана на кафедрі інженерної екології в Інституті енергозбереження та енергоменеджменту та відповідає вимогам Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» №2697-VIII від 28.02.2019 (введення в дію відбудеться 01.01.2020 року) у сфері поводження з промисловими відходами.

Мета дослідження: змодельовати прогноз впливу автомобільного транспорту в умовах "міських каньйонів" та "дворових колодязів" на прикладі конкретних вулиць міста Києва.

Для досягнення встановленої мети дослідження необхідно розв'язати наступні **завдання**:

- здійснити огляд літературних джерел та наукових напрацювань за темою дослідження;
- розглянути ряд моделей для вирішення проблем прогнозування і проаналізувати досвід їх використання;
- зібрати експериментальні дані з трьох вулиць міста Києва;
- на основі зібраних даних створити модель для прогнозу впливу автомобільного транспорту в умовах щільної забудови;
- створити стартап проект для проведення подібних розрахунків на

комерційній основі, обґрунтувати його економічну доцільність.

Об'єкт дослідження: забруднення дворів «колодязів» та міських каньйонів інгредієнтами викидів відпрацьованих газів автотранспортних засобів.

Предмет дослідження: розсіювання чадного газу, оксидів нітрогену та дрібнодисперсного пилу у дворах колодязного типу та міських каньйонах.

Методи дослідження: системний аналіз літературних джерел, наукові експерименти – визначення значення концентрацій речовин та трафіку транспорту, розробка моделі на основі експериментальних даних, графічний – для наочного аналізу результатів експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів: розробка полів дисперсії та концентраційних карт для конкретних вулиць, створення висновків розсіювання чадного газу, нітроген оксиду та дрібнодисперсного пилу в умовах вуличних каньйонах та дворів колодязів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розумінні майбутнього стану середовища в умовах міських каньйонів та дворів колодязів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати роботи викладено на XII Науково-технічній конференції магістрантів ІЕЕ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано статтю у збірнику матеріалів XII Науково-технічної конференції магістрантів ІЕЕ.

1 ПРОБЛЕМИ ВУЛИЧНИХ КАНЬЙОНІВ ТА ЗАБУДОВ «КОЛОДЯЗНОГО» ТИПУ

1.1 Загальний опис вуличних каньйонів та забудов «колодязного» типу

Вуличний каньйон – це забудований майданчик вздовж автомагістралі (рис. 1.1). Такі конструкції характерні як для маленького містечка, так і мегаполіса. Територія між нерухомими об'єктами є повноцінною системою зі змінним рівнем забруднення, у тому числі, техногенного, який демонструє екологічну ситуацію того чи іншого об'єкта. Говорячи про основні зони такої локації, окреслюють:

1. Навітряний бік, якому притаманний мінімальний показник патогенних домішок, що пояснюється регулярним доступом незабруднених мас повітря.
2. Внутрішній бік, для якого характерний високий показник забруднення.
3. Підвітряний бік, для якого характерний найвищий показник забруднення [1].

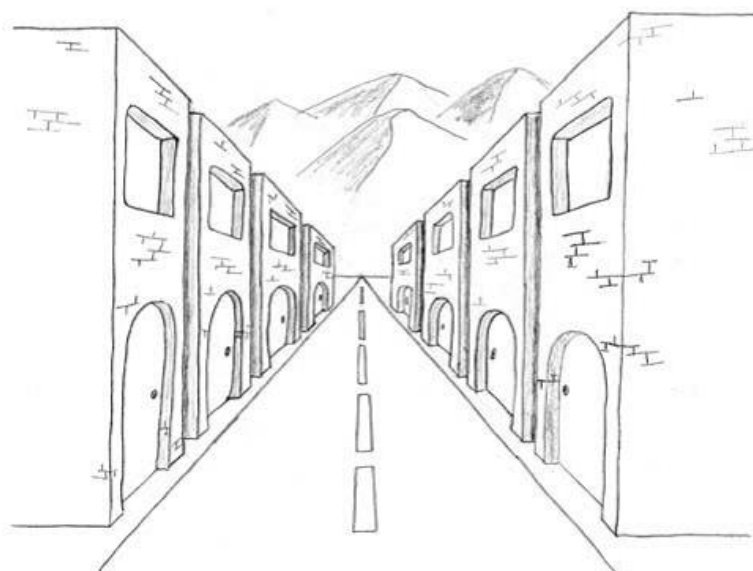


Рисунок 1.1 – Вуличний каньйон

Виконуючи дослідження як відбувається повітрообмін над вулицею (магістраллю), вчені використовують характеристику аеродинамічного стану

коефіцієнт ажурності нерухомості [2]. Це співвідношення площі проекції розривів поміж об'єктами нерухомості до загальної S проекції фронту забудов, що знаходяться на магістральній лінії.

Для вуличних каньйонів населеного пункту притаманні різноманітні геометрично-просторові особливості, серед яких довжина, ширина, щільність та композиція забудови, що характеризується середнім кутом повороту будинків до осі вулиці (магістралі). Традиційно застосовують класифікацію за формами – симетричні, асиметричні каньйони вулиці. На сьогодні активно застосовуються певні критерії, за допомогою яких класифікують аналізовані об'єкти [1,2]. Серед базових виділяють такі:

1. Взаємозалежність висоти конструкції середньозваженого типу (h) до ширини (d), довжини (l) до цієї специфічної висоти. Такі виміри ілюструють залежність геометричних параметрів від простору (табл.1.1).

2. Просторова орієнтація вуличного каньйону - формується як кут між лінією, що накреслена з півночі на південь і пріоритетною віссю магістралі.

3. Показник відкритого неба, який розраховується як порівняння висоти до ширини об'єкту. Він також ілюструє поперечний переріз локації.

4. Показник відкритого неба – фрагмент небесного купола, що оглядається з поверхні, з окремої точки, занурений у всю площину локації.

Таблиця 1.1 – Класифікація вуличних каньйонів за геометричними параметрами [3]

Співвідношення параметрів	Класифікація
$h/D < 0,5$	Низький каньйон
$h/D = 1$	Помірний каньйон
$h/D > 2$	Глибокий каньйон
$L/h < 3$	Короткий каньйон
$L/h = 5$	Середній каньйон
$L/h > 7$	Довгий каньйон

Забудови «колодязного» типу (рис 1.2) – забудови, двори яких, утворено стінами багатоповерхових будинків, розташованих близько між собою. Зазвичай присутнє підворіття, що виступає входом до цієї локації; нерідко є місцем для розміщення смітника, паркування автомобілів. Може мати проходи в сусідні двори (у цьому випадку називаються прохідними). Львів по праву є лідером серед українських міст з кількості таких двориків, тут розташований також найвужчий «дворовий колодязь» в Україні, ширина його становить 3м.

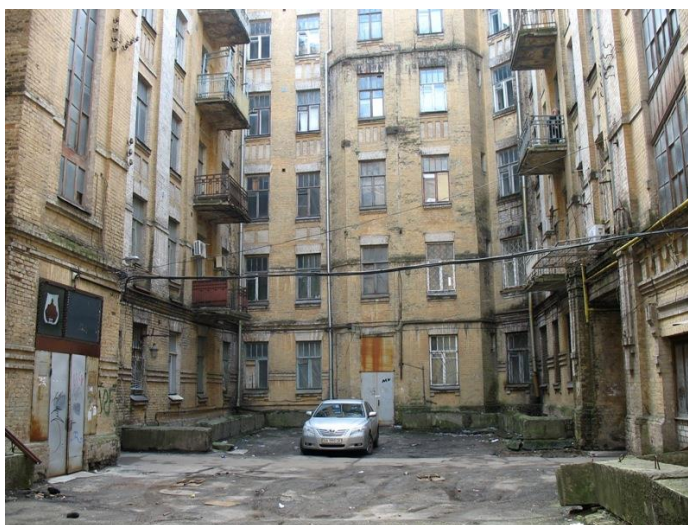


Рисунок 1.2 – Забудова «колодязного» типу

Історично утворилися такі «колодязі» із-за того що міські жителі намагалися використовувати кожен вільний клаптик землі: стали надбудовувати поверхи, бічні флігелі, робити арки. Так в містах і з'явилися двори-колодязі. Селилися в таких будинках люди з невеликим достатком. Існували норми, за якими до сусідньої стіни повинно було бути не менше 4 м 25 см по нашій метричній системі, але їх часто не дотримувалися.

Наприклад, схема, приведена на рис. 1.3, представляє варіант планування для вузької ділянки одної з вулиць Чернівців. Тут довелось звернутися до традиційної побудови дворів по периметру і обмежитися невеликими відступами на прикордонних брандмауерах: вони створили світлові шахти («двори-колодязі»).

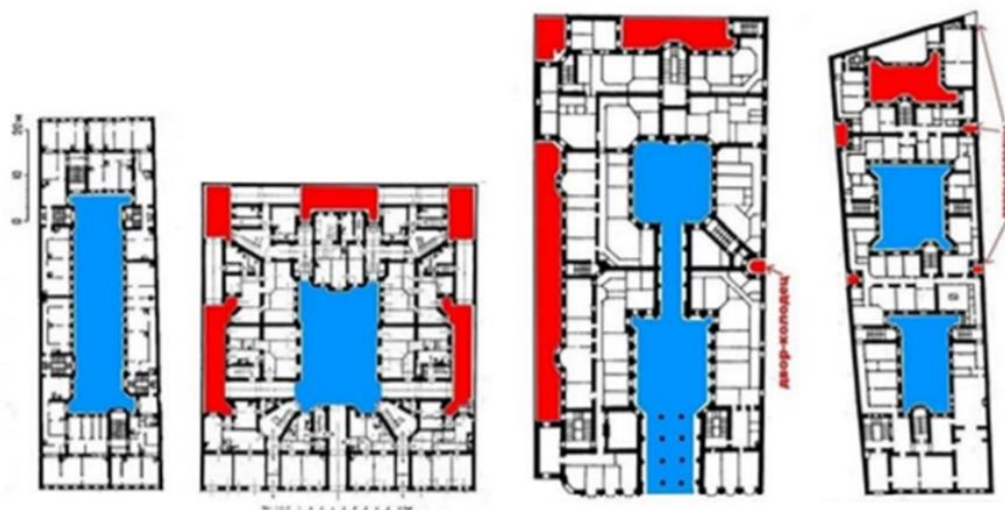


Рисунок 1.3 – Показове планування вулиці в місті Чернівці

На початку XX століття з'явилася тенденція будувати світліші і комфортні будівлі. Остаточно від «колодязів» відмовилися на наших територіях вже після революції, коли в стиль увійшов конструктивізм, який передбачав, що має бути більше простору. Незважаючи на це, і сьогодні в сучасних новобудовах можна знайти модернізований варіанти двору-колодязя.

1.2 Основні забруднювачі міських дворових територій та вплив на людину

Забруднення повітря, пов'язане з автомобільним транспортом, є однією з головних екологічних проблем у міських районах. Погіршення якості міського повітря відбувається внаслідок сукупного впливу джерел викидів від транспортних засобів, динамічних процесів (зменшена дисперсія, спричинена будівлями) та хімічних процесів (утворення вторинних забруднювачів).

Викиди від транспортних засобів, такі як NO_x , CO та леткі органічні сполуки (ЛОС), є домінуючими серед антропогенних джерел забруднюючих речовин всередині вуличних каньйонів урбанізованих районів. Багато таких викидів є реакційноздатними та піддаються хімічній обробці в міських

вуличних каньйонах з утворенням вторинних забруднюючих речовин, таких як O_3 та високореактивних радикалів (наприклад, NO_x) [4].

Беручи до уваги масштаб вуличного каньйону (невеликі відстані від джерел викидів до рецепторів), масштаб транспортування забруднюючих речовин становить близько хвилин, і тому процеси хімічного перетворення, що мають значення на вулицях, є процесами, що мають в порівнянні коротші часові масштаби. Таким чином, деякі забруднюючі речовини (такі як CO), на які хімічний перетворення не впливають суттєво за секунду, можна розглядати як пасивні скаляри (тобто які не вступають в реакцію) в контексті вуличного каньйону [5]. Однак це не стосується короткочасних забруднюючих речовин (таких як NO_2 та O_3) та високореактивних хімічних видів (таких як OH та HO_2). У таких ситуаціях для прогнозування кількості забруднюючих речовин у вуличних каньйонах слід враховувати хімічні реакції.

Забруднювачі повітря можна класифікувати на дві категорії: первинні забруднювачі повітря та вторинні забруднювачі повітря. Первинні забруднювачі повітря викидаються безпосередньо в атмосферу з джерел викидів і включають переважно оксиди азоту (NO_x), ЛОС та окис вуглецю (CO). У міських районах цей тип забруднювачів повітря, як правило, виникає в результаті спалювання палива.

NO_x утворюються, коли кисень (O_2) та азот (N_2) реагують під час будь-яких високотемпературних процесів горіння:



Основне джерело NO_x у міських районах це автомобільний транспорт. NO_x , що викидається з транспортних засобів, в основному у формі оксиду азоту (NO) з невеликою часткою діоксиду азоту (NO_2). Передові технології управління процесами горіння можуть сприяти зменшенню викидів NO_x . NO_2 може негативно впливати на здоров'я людини, наприклад, запалення дихальних шляхів, проблеми з легенями, респіраторні симптоми та алергії. Високий рівень

NO_x може спричинити шкідливий вплив на рослинність та середовища існування, що призведе до втрати біорізноманіття.

ЛОС (включаючи низку органічних забруднювачів повітря) у міських районах в основному утворюються внаслідок неповного процесу згоряння та випаровування палива, хоча найбільшим джерелом є рослинність. ЛОС можуть спричинити серйозні наслідки для здоров'я людини (наприклад, рак, вроджені вади та запаморочення) або пошкодити екосистему (наприклад, токсичність для рослин та тварин, накопичення в харчовому ланцюзі). Через їх токсичність важливі навіть незначні концентрації ЛОС. ЛОС відіграють важливу роль у утворенні O_3 і класифікуються разом за здатністю виробляти O_3 .

Вихлопні гази транспортних засобів є основним джерелом СО. СО утворюється внаслідок неповного згоряння вуглецю у паливі:



СО може впливати на доставку кисню до тканини з крові в організмі, блокуючи тим самим біохімічні реакції (що призводить до порушення роботи центральної нервової системи). Збільшення відношення повітря до палива та використання каталітичних нейтралізаторів можуть ефективно зменшити викиди СО від транспортних засобів [4, 5].

Вторинні забруднювачі повітря не викидаються безпосередньо, а потрапляють в атмосферу, коли первинні забруднювачі повітря піддаються хімічним процесам через хімічні реакції (табл. 1.2). Як один з важливих вторинних забруднювачів повітря, озон утворюється в результаті хімічних реакцій, що включають, головним чином, окислення ЛОС та NO_x у присутності сонячного світла. O_3 може негативно впливати на здоров'я людини (наприклад, подразнює очі, легені та ніс, спричиняючи пошкодження дихальних шляхів і навіть смерть) та рослинність (наприклад, втрата врожаю та якості врожаю, шкода деревам).

Таблиця 1.2 – Загальні форми атмосферних хімічних реакцій [6]

Тип реакції	Процес	Позначення
Бімолекулярний	Два реагенти поєднуються, утворюючи два продуктів.	$A + B \rightarrow C + D$
Три тіла	Два реагенти поєднуються, утворюючи один новий продукт. Третя, інертна молекула (М) стабілізується кінцевий продукт і виводить зайву енергію.	$A + B + M \rightarrow AB + M$
Фотоліз	Фотон сонячного випромінювання розриває хімічний зв'язок в молекулі	$A + h\nu \rightarrow B + C$
Теплова розкладання	Молекула розкладається після зіткнення з інертною молекулою (М)	$A + M \rightarrow B + C$

Визнано, що міський вуличний каньйон - це місце, в якому відбувається більшість видів активного відпочинку міського населення. Це також місця, де відбувається значний вплив людини для пішоходів, учасників дорожнього руху та мешканців сусідніх будівель, які можуть отримувати вентиляцію від зовнішнього середовища каньйону. Вплив таких середовищ, як правило, спричиняє несприятливі наслідки для громадського здоров'я. Оскільки як первинні, так і вторинні забруднювачі повітря мають неоднорідний розподіл у міських вуличних каньйонах і суттєво змінюються з часом, оцінити вплив таких забруднювачів нелегко. Очікується, що рівень пішоходів (висота дихання) у вулицях каньйонів буде відчувати особливо високий рівень забруднюючих речовин через близькість до викидів транспортних засобів.

Рівень забруднюючих речовин у вулицях каньйонів часто набагато перевищує рівень забруднення в широкому міському середовищі; наприклад, у 2005 р. виміряні дані на "супер-майданчику" Лондонської дороги Мерілебоун показали, що годинні концентрації NO_2 перевищували погодинну концентрацію в 853 рази [4, 6]. Ці перевищення норм щодо якості повітря зазвичай трапляються поблизу місцевих гарячих точок забруднення вуличних каньйонів.

1.3 Розсіювання поллютантів в умовах щільної та замкнутої забудови

У такому атмосферному відсіку, як «колодязна» забудова, природна вентиляція повітря через мікромасштабні динамічні процеси різко обмежена навколишніми будівлями. Будинки в міських районах є штучними перешкодами для атмосферного потоку і спричиняють недостатню вентиляцію вуличних каньйонів, тим самим приводячи до рівня забруднення повітря, набагато перевищує норми якості повітря.

Напрямок вітрів міста визначається напрямком вулиць і якщо потік повітря зустрічає перешкоду, то вітер слабшає, міняється його напрямок і зростає поривчастість, на рис. 1.4 представлені основні графічні варіанти напрямки місцевих вітрів, які утворюються при каньйонному міському ландшафту [7].

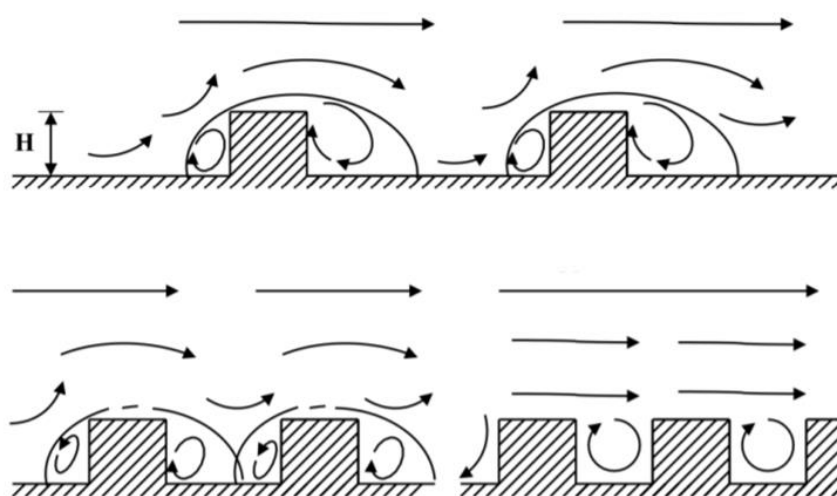


Рисунок 1.4 – Варіанти місцевої рози вітрів в умовах вуличного каньйону

Вітер та рух автотранспорту грає ключову роль в розсіюванні поллютантів у міському середовищі, тому дуже важливим є циркуляція повітря всередині забудов [8]. Архітектурно-планувальні особливості міського середовища

коригують напрямок вітру і змінюють швидкість вітру, це пояснюється наявністю місцевої циркуляції яка виникає від різниці температури повітря.

Так при слабких вітрах до 2-3 м/с біля поверхні землі може виникнути потік холодного повітря направлено до «острову тепла», а у вершині «острову тепла» утворюється потік теплого повітря направлено до околиць міста [6, 8]. Також відмінність у нагріві освітлених і затінених частин вулиць і дворів зумовлює місцеву циркуляцію повітря, теплий потік утворюється над поверхнею освітлених стін і піднімається вгору, а холодний потік утворюється над затіненими частинами вулиць і спускається вниз. Наявність водоймищ спричиняє денну місцеву циркуляцію від водойми до забудови.

Рослинність також великою мірою впливає на зміну характеристик повітряних мас й створює певні особливості дисперсії шкідливих домішок (ШД) у приземному шарі повітря. З одного боку, відбувається часткове поглинання токсикантів і внаслідок цього – очищення повітря від ШД. Проте ступінь такого очищення атмосферного повітря великою мірою визначається порою року, типом рослинності, погодними умовами тощо [9].

Водні об'єкти не тільки впливають на кліматичні і метеорологічні умови урбоєкосистем, а й частково можуть сорбувати ШД, створюючи природні геохімічні бар'єри для їх подальшого розповсюдження, у тому числі й на території дворів - "колодязів". Ці особливості місцевості обов'язково потрібно враховувати при моделюванні полів дисперсії ШД, що є компонентами відпрацьованих газів транспортних засобів [8, 9].

Висновки до розділу 1

1. Вуличні каньйони найбільш поширені типи ландшафтів міста. Від дворових «колодязів» в наше століття вже почали відмовлятися.
2. Основний забруднювач міст – автотранспорт, найбільш поширені речовини забруднювачі: оксиди азоту (NO_x), ЛОС та окис вуглецю (CO).

3. Вуличні каньйони та дворові «колодязі» створюють геометрію ландшафту при якому кардинально змінюються місцеві вітри і внаслідок цього розсіювання поліутантів ускладнюються.

4. Ареали розташовані прямо перед будівлями в умовах розглянутих типів забудов є найбільш небезпечними з точки зору миттєвого підняття концентрацій токсичних речовин для людини.

5. Нормативно-правові акти і будівельні норми не регламентують дану проблему, так як в загальному доволі складно регламентувати короточасні сплески концентрацій забруднювачів в прилеглих дворових територіях.

2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ В УМОВАХ ВУЛИЧНИХ КАНЬЙОНІВ

2.1 Моделювання забруднення атмосферного повітря

Для моделювання якості атмосферного повітря застосовуються моделі поширення домішок в атмосфері, які поділяються на 2 відповідні класи [10]:

1. Моделі розсіювання домішок в атмосфері.
2. Моделі забруднення атмосферного повітря.

Моделі розсіювання домішок в атмосфері можуть бути використані в самих різних цілях:

- визначення співвідношень між джерелом та рецептором;
- визначення внеску точкових джерел в сумарні концентрації;
- оцінка просторового розподілу концентрації;
- оптимізація стратегій зниження обсягу викидів;
- прогнозування зміни концентрацій забруднювачів в часі;
- аналіз репрезентативності станцій моніторингу;
- використання моделей як інструментів наукових досліджень.

Для застосування моделей слід знати географічні та метеорологічні дані та інформацію стосовно викидів і джерел забруднення [11]. Процеси атмосферної турбулентної дифузії описують моделями розсіювання і мають наступною класифікацією:

1. Гаусові моделі, відповідно до яких, концентраційний розподіл характеризується як гаусовий розподіл у вертикальних і горизонтальних напрямках.

2. Лагранжові моделі, де використовуються умовні частинки для імітації розсіювання або в яких відслідковуються процеси рухомих мас повітря.

3. Моделі Ейлера, що спроможні розв'язувати рівняння атмосферної дифузії чисельним методом.

Напівемпіричні моделі забруднення атмосферного повітря є основними. Вони базуються у більшості на емпіричній параметризації, а також використовують методи стохастичних та рецепторних моделей. В їх основі покладені моделі Ейлера, Лагранжа і Гауса [12]. Усі вони вибудовуються на основі алгебраїчних рівнянь, а також відрізняються між собою з урахуванням масштабів процесів атмосфери та представлені таким чином [13]:

1. Макромасштаб з протяжністю понад 1000 км. У цьому випадку атмосферний потік ототожнюється з явищем природи.

2. Мезомасштаб з тривалістю у діапазоні 1 – 1000 км. У цьому форматі потік повітря частково перебуває в залежності від 2-х факторів: синоптичних явищ і гідродинамічних ефектів. Беруться до уваги тип на щільність підстильної поверхні й перешкод, а також неоднорідність енергетичного балансу.

3. Мікромасштаб з протяжністю до 1 км. У цьому випадку повітряний потік в основному базується на особливостях поверхні.

Програмна реалізація таких математичних моделей на практиці виглядає як складна система з урахуванням різних факторів, зокрема таких:

- динаміка повітряних потоків турбулентного типу;
- перенесення прямого та дифузного випромінювання від сонця;
- вплив випромінювання на теплові процеси фотохімічного типу;
- динаміка водяної пари і крапель;
- конденсація і випаровування;
- поглинання і вивільнення забруднювачів краплями.

Варто зазначити: складні математичні моделі поширення речовин, які забруднюють повітря, формуються під певне завдання конкретними організаціями або науково-дослідними інститутами.

2.2 Прогнозування якості атмосферного повітря

Для прогнозу якості повітря використовується велика різноманітність методик – від найпростіших до комплексних. На сьогодні більшість з них спрямовані на проведення швидкого (1-3 дні) прогнозування концентрації речовин, що забруднюють повітря [14].

Кліматологічні. Використання кліматології як засіб прогнозування якості повітря формується на припущенні, у рамках якого минуле найкращим чином пророкує майбутнє. Такий метод заснований на взаємозв'язку підвищених рівнів забруднення з урахуванням конкретних метеорологічних умов. Прогнозування якості повітря може бути настільки ж простим, наскільки нескладне припущення про сталість. Фактично: якщо актуальні рівні забруднення високі, то завтра вони будуть аналогічними [12, 13]. При цьому може бути залучена розробка складних типових синоптичних умов. Такі підходи найчастіше застосовуються для прогнозу рівня перевищення граничних концентрацій речовин в навколишньому середовищі. Їх плюси у простоті та економічності.

Статистичні методи. Взаємозв'язок між певними метеорологічними параметрами і станом повітря може бути визначений кількісно, використовуючи безліч статистичних методик. Для прогнозування вони фактично є найбільш загальними. Всього ідентифікують три використовуваних статистичних підходів, про які написано нижче.

Класифікація і дерево регресу. Ця методика заснована на використанні спеціалізованого програмного забезпечення для ідентифікації тих змінних, які найбільш тісно пов'язані з рівнями забруднення навколишнього середовища. Далі ці змінні використовуються для передбачення майбутніх рівнів забруднення, використовуючи дані про поточний стан повітря і прогнозу погоди [13, 14].

Регресійний аналіз. Взаємозв'язок між рівнем забруднення і метеорологічними і аерометричними змінними може бути визначений кількісно

за допомогою аналізу наборів ретроспективних даних, використовуючи стандартні статистичні пакети аналізу. Результируюче множинне лінійне рівняння регресу може використовуватися для прогнозування рівнів забруднення.

Штучні нейронні мережі. Ще один метод аналізу ретроспективних даних, який полягає в тому, щоб ідентифікувати атмосферні параметри, які впливають на якість повітря і кількісно оцінити цей вплив за допомогою засобів самонавчального алгоритму, який використовує адаптивне навчання та розпізнавання образів, як нейронні мережі. Нейронні мережі засновані на імітації процесу розпізнавання повторюваних образів, який притаманний людському мозку. Були розроблені нейромережі, які ідентифікують синоптичні умови, пов'язані з підвищенням рівня концентрації озону. Ймовірно, така ж методика може бути застосована і до інших забруднюючих речовин. Дані підходи є більш складними, ніж кліматичні, але при цьому вони досить прості в реалізації і використанні, вимагають невеликих обчислювальних ресурсів і незначних спеціальних знань.

Тривимірні (3-D) моделі. Хоча методики, описані вище, мають багато переваг, у них є один спільний недолік. Вони припускають деяку стабільність процесів, що визначають стан повітря. Будь-які кліматичні зміни (короткострокові або довгострокові) або зміна кількості викидів знижують ефективність цих методик [15]. Один із шляхів вирішення даної проблеми полягає в тому, щоб використовувати більш детермінований підхід в прогнозуванні якості повітря. Детерміновані 3-D моделі стану повітря прагнуть математично представити всі найважливіші процеси, що впливають на рівень забруднення довкілля. Ці моделі фактично складаються з декількох підмоделей, які взаємодіють при моделюванні викиду, передачі або перетворення забруднення повітря. Приклади таких підмоделей наступні.

Моделі викидів. Формують розподіл у просторі викидів та домішок речовин, що забруднюють, і/або (у разі вторинних забрудників) попередніх викидів, що спровоковані антропогенними або природними джерелами.

Метеорологічні моделі. Прогнозують певні умови метеорології, вплив хімічних чинників, серед яких температурний показник, сонячна активність, вологість, випромінювання та опади, які формують перенесення та дифузію речовин-забрудників [16]. Моделі траєкторій використовують 3D метеорологію у комплексі з інформацією про викиди для прогнозування рівнів таких нереактивних забруднювачів навколишнього середовища, наприклад, дим та пил.

Хімічні моделі. Ці моделі використовують рівні основних параметрів хімічної кінетики, спектроскопічні властивості і термодинамічні співвідношення для моделювання перетворення первинного забруднення у вторинне забруднення, враховуючи властивості композиції і морфологію аерозолів.

2.3 Модель Land use regression для оцінки забрудненості повітря та його прогнозування

Land use regression (LUR) - підхід для оцінки забруднення повітря в місті, що відрізняється високим просторовим дозволом [17]. Метод поєднує в собі вимір забруднення повітря в невеликому числі місць і побудови статистичних моделей на основі експериментальних даних про забруднення і даних геоінформаційних систем (ГІС).

Не існує загального опису методу проведення LUR моделювання, кожне дослідження відрізняється не тільки місцевістю і пов'язаними з цим особливостями, а й вибором змінних ГІС і алгоритмами проведення досліджень, тому можна описати лише загальний підхід. Спочатку вимірюються рівні забруднення атмосферного повітря в обмеженому числі місць. У кожному дослідженні ці місця ретельно відбираються таким чином, щоб в результаті моніторингу отримати весь спектр можливих концентрацій в місті.

Далі для кожного місця вимірювання обчислюється ряд географічних змінних ГІС, які, як припускають, можуть бути пов'язані з забрудненням. Зазвичай змінними ГІС є кількісні змінні, що описують місце розташування точок вимірювання, тип землекористування, щільність забудови, показники інтенсивності автомобільного руху та ін. Потім проводиться регресійний аналіз для визначення взаємозв'язків вимірюваних концентрацій та отриманих змінних ГІС. В результаті виходять регресійні рівняння, які можуть бути використані для оцінки концентрацій забруднюючих речовин в будь-якому місці, для якого відомі змінні ГІС (в будь-якій точці міста).

Після успіху новаторського дослідження SAVIAN, методи LUR все більше використовувалися в епідеміологічних дослідженнях протягом останнього десятиліття [18].

Використовуючи метод LUR можна оцінити індивідуальні експозиції за допомогою методик, в яких для розрахунку забруднення використовуються результати вимірювань і статистичні моделі, засновані на кількох змінних, що описують місця вимірювань.

В даний час метод LUR не стандартизований, і варіанти його застосування розрізняються в кожному дослідженні. При цьому основні етапи роботи є однаковими (наведені на рис. 2.1.).

Перший етап – проведення інструментальних вимірювань рівнів забруднення в обмеженому числі точок спостереження. Як правило, число місць вимірювань варіюється від 40 до 80 для опису всього міста, методи вимірювань - пасивний або активний відбір проб повітря з тривалістю відбору від 7 до 14 днів. Відповідно до цілей дослідження і обраним методом визначається місця розташування вимірювальної апаратури. Будується геоінформаційна модель міста і з її допомогою обчислюється ряд географічних змінних, які, як припускають, можуть бути пов'язані з рівнями забруднення. Зазвичай ці змінні описують місце розташування, тип землекористування, щільність забудови, щільність населення, показники трафіку та ін.

Другий етап - статистичний аналіз отриманих експериментальних даних. В результаті виходить регресійна модель - рівняння взаємозв'язку вимірюваних концентрацій та отриманих змінних ГІС. Регресійна модель може бути використана для оцінки концентрацій забруднюючих речовин в будь-якому місці, для якого відомі змінні ГІС, і для побудови карти розподілу забруднювачів.



Рисунок 2.1 – Загальний алгоритм моделювання LUR

Суворої методології для визначення місць відбору проб і їх кількості не розроблено. Серед вже проведених досліджень число проб варіювалося від 18 до 120. Очевидно, що число проб повинно залежати від місцевих особливостей, очікуваних варіацій вимірюваних концентрацій, а також розміру області, в якій проводиться дослідження. Для моделювання рівнів забруднення великого міста вважається доцільним використовувати від 40 до 80 ділянок відбору проб.

Після проведення вимірювальної кампанії і визначення змінних-предикторів проводиться статистичний аналіз отриманої інформації. Для

створення прогностичної моделі забруднення використовується метод множинної лінійної регресії, рівняння якої пов'язує рівень забруднення Y (виміряні концентрації забруднюючої речовини) і змінні-предиктори X . В ряді досліджень використовують абсолютні значення концентрацій, в інших - логарифм концентрації (для наближення розподілу вимірних концентрацій до нормального розподілу, що важливо для моделей лінійної регресії). Інтерпретації таких моделей виходять різними: при використанні абсолютних значень кожна змінна відображає абсолютний вклад в модель, при використанні логарифма - відносна зміна.

Для створення моделі з мінімальним числом предикторів і максимальним відсотком зрозумілої дисперсії Y (максимальне значення R^2) найчастіше використовується метод покрокової регресії вперед, покрокової регресії назад і автоматичний вибір кращого набору змінних. Можливі інші варіанти відбору змінних моделі, в яких, наприклад, може враховуватися їх предметний зміст. Наприклад, у Ванкувері використовувався наступний алгоритм побудови моделей LUR для NOX і PM [17, 18]:

1. Ранжування всіх предикторів за величиною їх коефіцієнта кореляції з вимірними концентраціями забруднювача.
2. Вибір одного предиктора з кожної групи однотипних предикторів, який корелює з концентрацією забруднювача сильніше інших.
3. Розрахунок коефіцієнтів кореляції між предикторами, відібраними на другому етапі побудови моделі.
4. Виключення таких предикторів, які корелюють один з одним з коефіцієнтом кореляції Пірсона $r \geq 0,6$.
5. Проведення покрокового регресійного аналізу з рештою змінними.
6. Виключення зі списку предикторів тих змінних, які є статистично незначущими (по t -критерієм) і/або знаків коефіцієнтів які суперечать предметному змісту моделі.
6. Повтор кроків 4 і 5 для решти змінних і видалення змінних, які вносять менше 1% в значення коефіцієнта R^2 остаточної моделі.

Кінцевим продуктом є модель множинної регресії у вигляді:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_kX_k, \quad (2.1)$$

де Y – концентрації забруднювача;

X_1, X_2, \dots, X_k – змінні-предиктори;

b_0, b_1, \dots, b_k – коефіцієнти моделі.

Зазвичай модель включає від 3 до 6 змінних-предикторів. Збільшення числа предикторів може підвищити якість моделі (збільшити значення R^2), проте їх включення може спотворити предметний сенс отриманої моделі.

Отримана регресійна модель може бути відображена на карті концентрації забруднювача в ГІС [19]. Для цього всі змінні-предиктори перетворюються в растрові шари даних для території, де є така можливість. Приклад такої карти приведений на рис. 2.2. Далі для цієї області буде обчислюється рівень забруднення на основі отриманого рівняння і коефіцієнтів моделі.

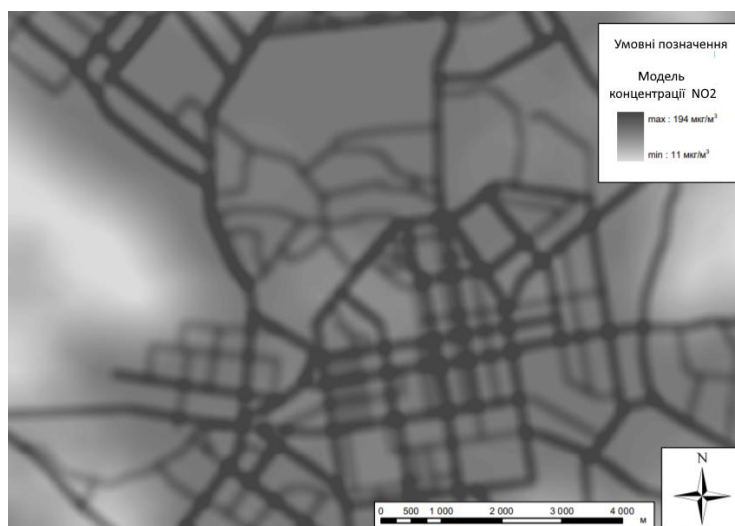


Рисунок 2.2 – Приклад карти регресійної моделі

Серед LUR моделей, створених для розробки карт NO_2 , NO_x , сажі і летючих органічних сполук, коефіцієнт детермінації R_2 , як правило, близько 60-70%. Зазвичай для досягнення цього показника необхідно лише кілька змінних, наприклад, що описують інтенсивність руху, щільність населення, висоту над рівнем моря і тип землекористування. Відмінності отриманих R_2 серед досліджень можуть бути пов'язані з початковою мінливістю вимірних концентрацій, якістю змінних-предикторів, підходом до моделювання і складністю міста, наприклад, з точки зору відмінностей в джерелах викидів. На підтримку LUR моделювання виступає той факт, що помилки у всіх LUR дослідженнях були низькими з предметної точки зору.

2.4 Модель обчислювальної динаміки рідини для вуличних каньйонів

Обчислювальна динаміка рідини (CFD) - це потужна методика чисельного моделювання для дослідження експериментальних проблем потоків, для характеристики процесів змішування забруднювачів повітря та для детального розподілу потоку каньйону та дисперсії забруднювачів із високою просторово-часовою роздільною здатністю [20]. CFD включає ряд числових рівнянь, що регулюють турбулентний потік та дисперсію реакційноздатних забруднюючих речовин, що потенційно включає взаємодію як динаміки, так і хімії. CFD можна в основному класифікувати на дві категорії на основі схем закриття турбулентності:

- усереднене за Рейнольдсом Нав'є – Стокса (RANS);
- симуляція великих вихорів (LES).

RANS визначає лише усереднені за часом властивості з усіма модельованими рухами турбулентності. Таким чином, RANS, як правило, добре встановлений і обчислювально швидкий. Замість усереднення часу, що використовується у RANS, LES приймає операцію просторової фільтрації, яка може безпосередньо вирішувати великі вихри та обчислює дрібномасштабні

вихори за допомогою моделей підмережної шкали. LES зазвичай вимагає більших обчислювальних витрат.

Розміри великих вихорів, як правило, можна порівняти з характерними масштабами довжини атмосферного турбулентного потоку, які більше залежать від геометрії каньйону вулиці та граничних умов турбулентного потоку. З іншого боку, невеликий масштаб вихорів, як правило, має універсальну поведінку у всій обчислювальній області і в більшій мірі залежать від локального розсіювання енергії. Застосування RANS та LES у динаміка вулиць-каньйонів буде розглянута нижче.

2.4.1 Усереднений Рейнольдс Нав'є – Сток

RANS може швидко визначити середній турбулентний потік в просторі і широко використовується в інженерних програмах. Найчастіше використовувані турбулентні моделі RANS для дослідження потоку міських каньйонів включають: стандарт турбулентної кінетичної енергії (k) і показник розсіювання (ϵ), перенормовану групу (RNG), модель стресу Рейнольдса (RSM).

Ця стандартна k - ϵ модель добре задокументована і може виконувати загальну структуру для повністю турбулентного потоку. Однак для потоку вулиці-каньйону він не передбачає турбулентної кінетичної енергії з хорошою точністю в регіонах, розташованих близько до стіни або до зсувного шару на рівні даху каньйону.

Ця модель широко застосовувалася для наукових цілей. Наприклад, в 2002 році Мемон та інші застосували RNG модель до 2D ізольованих вуличних каньйонів [21]. Модель недооцінила нормалізовану горизонтальну швидкість на рівні даху каньйону, на 10%, оскільки ефект тривимірних міських кварталів та елементів шорсткості в експерименті не був повністю представлений двовимірною моделлю. В тому ж році Тянь та його колеги розробили

ідеалізовану 3D-модель на основі реалізованої k моделі та дослідити дисперсію потоку навколо масивів будівель. Їх модель добре фіксувала вторинну овальну завихреність навколо будівель та повітрообмін між внутрішніми та зовні вулиці.

2.4.2 Моделювання Large-Eddy

Незважаючи на те, що RANS обчислювально швидкий і широко застосовується, є деякі обмеження, такі як обробка складних геометрій, що включають розділення (наприклад, будівельні блоки), обробка біля стін та емпіричні параметри моделі. Підхід великого вихрового моделювання працює краще, ніж RANS, з точки зору точності моделювання турбулентності потоку, але має більші обчислювальні витрати.

LES, як правило, є перспективним інструментом для дослідження турбулентних процесів змішування в дослідницьких цілях. Ця модель потенційно може служити альтернативою експериментам для прогнозування характеристик потоку вулиць-каньйонів у містобудуванні. Наприклад Ченг і Лю в 2011 році використовували модель LES для дослідження турбулентного потоку та видалення забруднюючих речовин у вуличних каньйонах. Максимальні значення стандартних відхилень потоку вітру були знайдені поблизу навітряних кутів на рівні даху. Структура турбулентності зовнішнього потоку суттєво впливала на турбулентну кінетичну енергію всередині каньйону та на обмін імпульсом на рівні даху каньйону, але менше на середню швидкість руху всередині каньйону [21].

2.5 Модель дисперсії забруднення атмосферного повітря

Фізична проблема складається з місцевого джерела, яке розподілено по поверхні міста з кінцевою відстанню проти вітру та нескінченними розмірами поперечного вітру [22]. Припускається, що забруднюючі речовини викидаються

з постійною швидкістю із місцевого джерела і поширюються всередині шару змішування, прилеглого до земної поверхні, де перемішування відбувається в результаті турбулентності та конвективного руху. Цей шар змішування поширюється вгору від поверхні до висоти, де всі турбулентні розбіжності потоку, що виникають внаслідок поверхневої дії, практично падають до нуля. Забруднюючі речовини транспортуються по горизонталі великомасштабним вітром, який є функцією вертикальної висоти z і горизонтально, а також вертикально місцевим вітром, спричиненим міським джерелом тепла, так званим мезомасштабним вітром.

Основне рівняння основного забруднювача можна записати як:

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} + U(x, z) \frac{\partial C_p}{\partial x} + W(z) \frac{\partial C_p}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(z) \frac{\partial C_p}{\partial z} \right) - k C_p, \quad (2.2)$$

де C_p - середня концентрація забруднюючих речовин, мг/м^3 ;

t – час, год;

$U(x, z)$ – середня швидкість вітру в напрямку x та z , м/с ;

$W(z)$ – середня швидкість вітру в напрямку z , м/с ;

K_z – турбулентна дифузійність вихрових вихорів у напрямку z ;

k - коефіцієнт швидкості хімічної реакції першого порядку.

І для вторинного забруднювача:

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} + U(x, z) \frac{\partial C_s}{\partial x} + W(z) \frac{\partial C_s}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(z) \frac{\partial C_s}{\partial z} \right) + W_s \frac{\partial C_s}{\partial z} + V_g k C_p, \quad (2.3)$$

де C_s - осідання вторинного забруднювача;

V_g - масове відношення вторинних частинок до первинних; газоподібних видів, які перетворюються;

W_s - гравітаційна швидкість, м/с.

Для вирішення рівняння (2.2) та рівняння (2.3) потрібно знати реалістичну форму змінної швидкості вітру та вихрової дифузійності. Результати цієї моделі можуть дати шлях для визначення точного розподілу концентрації для випадку, коли впливом сили тяжіння на частинки великих розмірів не можна нехтувати. Концентрація вторинних забруднювачів зменшується із збільшенням гравітаційної швидкості осідання як у стабільному, так і в нейтральному випадку.

Ефект міського теплового острова генерує їх власні мезомасштабні вітри і запобігає розповсюдженню забруднюючих речовин, що призведе до збільшення концентрації забруднення в атмосфері [21, 22]. Міський острів тепла сприяє розвитку помутніння забруднених забруднювачів, а також допомагає цим забруднювачам циркулювати вгору, тим самим ускладнюючи проблему забруднення.

Висновки до розділу 2

1. Моделей для розсіювання забруднювачів існує великий ряд. Але кожна модель створена під якусь конкретну проблему або наукову цікавість. Універсальних моделей розсіювання невелика кількість.

2. Сучасні моделі все більше відходять від стандартних чисельних методів і починають більше спиратися на велику базу даних яка оброблюється нейромережами.

3. Модель Land use regression – одна з небагатьох гнучких універсальних моделей, яка немає чіткого алгоритму, а спирається більше на експериментальні дані.

4. Для динаміки, методика CFD стала потужним чисельним інструментом, в основному, включаючи моделі RANS та LES. Моделі RANS за своєю природою є стаціонарною методологією, тоді як моделі LES можуть впоратись

з нестійкістю та періодичністю потоку та отримати тимчасову структуру потоку турбулентності у вуличних каньйонах. Вибір між ними залежить від обчислювальних витрат, необхідної точності і, отже, застосування.

5. Потужний апарат для точних обчислювань надають моделі дисперсії забруднювальних речовин.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУ РОЗСПИВАННЯ ПОЛЮТАНТІВ ЗА БЕРЛЯНДОМ

3.1 Вплив забруднювачів на мешканців нижніх поверхів та їх накопичення в приміщеннях

Найбільша концентрація забрудників спостерігається на 1–3 поверхах, навіть без урахування локації, де розміщена будова. Від висоти 4-го поверху концентрація забрудників зменшується, зокрема це стосується вихлопних газів від транспорту. Коли справа стосується викидів від ТЕЦ, то захиститися від них набагато складніше. Один із найбільш канцерогенних газів – чадний, а окрім того шкідливими на організм людини є дрібнодисперсний пил та оксиди нітрогену.

3.1.1 Чадний газ

Чадний газ представлений як газ без кольору. Оскільки він не має запаху, но важко відчуту його концентрацію у повітрі, а відтак це дуже небезпечно для людини. Газ горить, виділяючи синє полум'я, і під час цього процесу виділяється вуглекислий газ. CO_2 – діоксид вуглецю токсичний і за рівнем небезпеки максимально наближений до синильної кислоти [23].

Норма повітря у середньому показнику на добу сягає $3,0 \text{ мг/м}^3$, але це для населених регіонів. В атмосферному повітрі гранично допустима концентрація немає перевищувати $5,0 \text{ мг/м}^3$ за умови максимального півгодинного впливу. Речовина має 4-ий клас небезпечності.

Коли чадний газ потрапляє в організм, він вступає в хімічну реакцію з гемоглобіном та утворюється сполука карбоксигемоглобін (H_6CO). Кров не може розносити кисень в усі тканини та органи, і людина у буквальному сенсі слова помирає від задухи. Оскільки чадний газ має властивість накопичуватися, він формує негативний вплив навіть у невеликих дозах.

Серед основних факторів, які збільшують токсичну дію СО, виділяють такі:

- вібрація;
- підвищення чи зниження температури, у тому числі, занадто різко;
- активне фізичне та розумове навантаження;
- домішки деяких додаткових речовин.

Коли СО в організмі, або коли в навколишньому середовищі його забагато, провокується ситуація кисневого голодування. Це провокує різні захворювання, а інколи навіть смерть.

Дослідники проаналізували вплив СО на організм, враховуючи вікові та статеві характеристики. Так, чоловіки менш витривалі до дії цього токсичного газу, а літні люди більш схильні до критичних проявів речовини, ніж діти. Особливо небезпечний СО для вагітних та підлітків. Якщо організм отруюється чадним газом у першому триместрі вагітності, це може спровокувати розвиток енцефалопатії важкого перебігу та інші каліцтва дитини [24].

Якщо говорити про легкий ступінь отруєння, то у людини спостерігається така симптоматика:

- запаморочення;
- шум в вухах;
- головний біль;
- панічна атака;
- підвищена спрага.

Говорячи про середній ступінь отруєння, треба окреслити такі симптоми:

- почервоніння шкіри обличчя;
- збільшення температури тіла;
- запаморочення та навіть втрата свідомості;
- неадекватна поведінка.

Якщо людину вивести на свіже повітря, то протягом 15–30 хвилин симптоматика зупиняється та людині стане набагато краще.

Важке отруєння характерно втратою свідомості на тривалий час, порушується частота дихання та серцевих скорочень, шкіра отримує блідо-синій відтінок, а часто спостерігається зупинка дихання.

3.1.2 Оксиди нітрогену

Група реактивних газів N_2O_3 , NO_2 , N_2O_4 у вигляді оксидів азоту формується у результаті засилля та активного користування автомобільним транспортом. Чим вище температура двигуна, тим кількість сполук вище. Викиди NO_x у процесі горіння здебільшого представлені у вигляді NO_2 , і є одними з найбільш активних забрудників повітря. Деякі леткі підвиди сполуки можуть проникати в атмосферу, формувати кислотні дощі та ставати самі по собі активними видами отрути. Як результат, активізуються алергічні реакції, респіраторні застуди, прояви астми та часто спостерігається подразнення слизових оболонок. За класом небезпечності оксиди азоту займають 4-у позицію.

Діоксид азоту подразнює дихальні шляхи, негативно змінює склад крові, зменшуючи вміст гемоглобіну. Це негативно проявляється для людей з хворобами органів дихання, а також із серцево-судинними захворюваннями. Постійний вплив таких компонентів зменшує імунні властивості організму, негативно впливає на здатність довго та продуктивно працювати, підсилює негативний вплив інших токсичних речовин, а також активізує прояв формування злоякісних пухлин [25]. Часто діагностують кисневе голодування. Речовина найбільш небезпечна для дітей та підлітків.

3.1.3 Дрібнодисперсні частинки пилу

Пил дрібної дисперсії – один із найбільших та агресивних забруднювачів повітря, який негативно впливає на здоров'я людей, зокрема у великих мегаполісах. За своїм зовнішнім виглядом, це дрібні частки, які наявні в

повітрі, а їх розмір не перевищує 10 мкм. Невеликі розміри та вага провокують те, що частинки постійно у повітрі і не осідають. Особливу небезпеку для людини у будь-якому віці становить пил, розмір якого менше ніж 0,5 мкм [26].

Серед основних компонентів дрібнодисперсного пилу у середовищі міста, такі:

- крихти цементу;
- сажа;
- бруд;
- інші дрібні компоненти.

Оскільки їх розмір незначний, частини з легкістю проходять через фільтри організму та прямо потрапляють у легені, де відбувається потрапляння у кров. Самостійно організму важко, а часом зовсім неможливо вивести таку кількість бруду, тому порушується нормальне циркулювання крові, лімфи, з'являються гострі та хронічні хвороби.

Ускладнює ситуацію той факт, що частини пилу канцерогенні, а сажа збирає на собі інші агресивні летючі сполуки. Вугілля (як один з компонентів сажі) – відомий абсорбент, тому він накопичує негативні речовини у собі, а далі вони потрапляють у кров і починають розчинятися. Серед найбільш небезпечних забрудників виділяють оксид азоту та сірки. Згідно із результатами наукових та медичних досліджень на предмет токсичності речовин, такі компоненти можуть провокувати зміни у стані здоров'я:

- пошкодження клітин ДНК;
- клітинні зміни;
- цитотоксичність.

3.2 Факельна модель за Берляндом

Методика спрямована на розрахунок можливого розподілу концентрації викидів із максимальним значенням за умов нестійкого (помірного) стану атмосфери протягом 20–30 хвилин, саме із-за цього була обрана ця модель для

розрахунків в роботі. При цьому методика не враховує ряд важливих факторів, серед яких [27]:

- шорсткість поверхні;
- клас стійкості атмосфери.

За потреби метод може використовуватися, щоб розрахувати концентрацію домішок від джерела речовин, але на відстані, яка не перевищує 100 км.

Методика Берлянда – нормативна, негаусова модель поширення забруднювачів від різних джерел. Розрахунок відбувається з урахуванням норм для приземного прошарку атмосфери [28].

Ступінь забруднення атмосферного повітря характеризується найбільшим розрахованим значенням концентрації c_m при несприятливих метеорологічних умовах, відповідному вибору коефіцієнту A і небезпечної швидкості вітру u_m .

Згідно з моделлю Берлянда максимальне значення приземної концентрації речовини c_m при викиді газоповітряної суміші з одиночного точкового джерела з круглим гирлом на відстані X_m від джерела визначаються за формулою, отриманої на основі рішення рівняння турбулентної дифузії [28]:

$$c_m = \frac{A * M * F * t * n * \eta}{H^2 * \sqrt[3]{V_1 * \Delta T}}, \quad (3.1)$$

де A – коефіцієнт температурної стратифікації атмосфери;

M – маса шкідливої речовини, що викидається в атмосферу в одиницю часу, г/с;

F – безрозмірний коефіцієнт, що враховує швидкість осідання шкідливих речовин в атмосферному повітрі:

- для газів і дрібнодисперсних аерозолів зі швидкістю упорядкованого осідання, що практично дорівнює нулю, $F = 1$;
- для дрібнодисперсних аерозолів (крім першого випадку) при ступені очищення газів, що відходять більше 90% $F = 2$;

- для дрібнодисперсних аерозолів (крім першого випадку) при ступені очищення газів, що відходять 75 ÷ 90% $F = 2,5$;
- для дрібнодисперсних аерозолів (крім першого випадку) при ступені очищення газів, що відходять менше 75% $F = 3$;

m і n – коефіцієнти, що враховують умови виходу газоповітряної суміші з гирла джерела;

η – безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості (для слабопересічної місцевості з перепадом висот, що не перевищує 50 м на 1 км приймається рівним 1);

H – висота викиду над рівнем землі, м;

ΔT – різниця між температурою, що викидається газоповітряної суміші;

V_1 – витрата газоповітряної суміші:

$$V_1 = \frac{\pi D^2}{4} * w_0, \quad (3.2)$$

де D – діаметр гирла джерела викиду, м;

w_0 – середня швидкість виходу газоповітряної суміші з гирла джерела викиду, м/с.

Значення коефіцієнтів m і n з формули 3.1 визначаються в залежності від параметрів f , V_m за формулами (3.3) і (3.4):

$$f = \frac{10^3 * w_0^2 * D}{H^2 * \Delta T}, \quad (3.3)$$

$$V_m = 0.65 * \sqrt[3]{\frac{V * \Delta T}{H}}. \quad (3.4)$$

Значення m розраховується залежно від параметра f по одній з наступних формул, якщо $f < 100$ тоді:

$$m = \frac{1}{0.67 + 0.1\sqrt{f} + 0.34\sqrt[3]{f}}. \quad (3.5)$$

Якщо $f \geq 100$, тоді:

$$m = \frac{1.47}{\sqrt[3]{f}} \quad (3.6)$$

Значення коефіцієнта n вибирається в залежності від значення параметра V_m . Якщо $V_m \leq 0.3$, тоді $n = 3$. У випадку коли $V_m > 2$, тоді $n = 1$. Якщо $0.3 < V_m \leq 2$, тоді n розраховується по формулі:

$$n = 3 - \sqrt{(V_m - 0.3)(4.36 - V_m)}. \quad (3.7)$$

Показник забруднення визначається найбільшим розрахованим значенням концентрації c_m під час несприятливих умов погоди. Враховується в обчисленнях швидкість вітру u_m та коефіцієнт A . Чим потужніший вітер, тим вище турбулентність потоку, і, відповідно, інтенсивніше поширюються небезпечні компоненти. При цьому, коли збільшується швидкість вітру, зменшується висота факела над гирлом труби. Проте швидкість потоку повітря не є метеорологічним фактором для усієї промислової будівлі, де розташовані різні джерела викидів [27, 28]. Числові значення розраховуються окремо для кожного з них з урахуванням комплексних технічних характеристик.

3.3 Побудова моделей дисперсії для шкідливих речовин та карт концентрацій ШД

За допомогою студентів 2 та 3 курсів були зроблені спостереження за забрудненням і транспортною ситуацією в місті Київ по цих адресах:

- двір за адресою проспект Перемоги, 60;
- двір за адресою проспект Перемоги, 45;
- двір за адресою вул. Борщагівська, 117.

На основі спостережень було змодельовано екологічні ситуації на дорогах поряд з будинками, частково забруднення від дороги, огинаючи будинки, розповсюджується і на територію дворів, а також наявність машин, парковок, роботи на холостому ході та холодний запуск автомобілів спричинює надзвичайне локальне забруднення території, яке потрапляє у вікна жителів, а не може розсіюватися в повітряному середовищі вільно. Дані по окремо по кожній обраній речовині наведені нижче.

У дослідженні для побудови математичних моделей розсіювання й концентрування забруднюючих речовин у приземному шарі придорожного простору та встановлення й прогнозування екологічного стану досліджуваних територій використовуємо метод М. Є. Берлянда в інтерпретації В. О. Холоднова з колегами [29].

Ідея методу полягає в тому, що у програмному комплексі MathCad реалізується модель факельного наближення. Модель подається у вигляді поля дисперсії з зазначенням кратності перевищення ГДК зі швидкістю вітру 1 м/с, 3 м/с та 5 м/с. Поля дисперсії для чадного газу, оксиду нітрогену та дрібнодисперсного пилу представлені нижче (рис. 3.1 - 3.9).

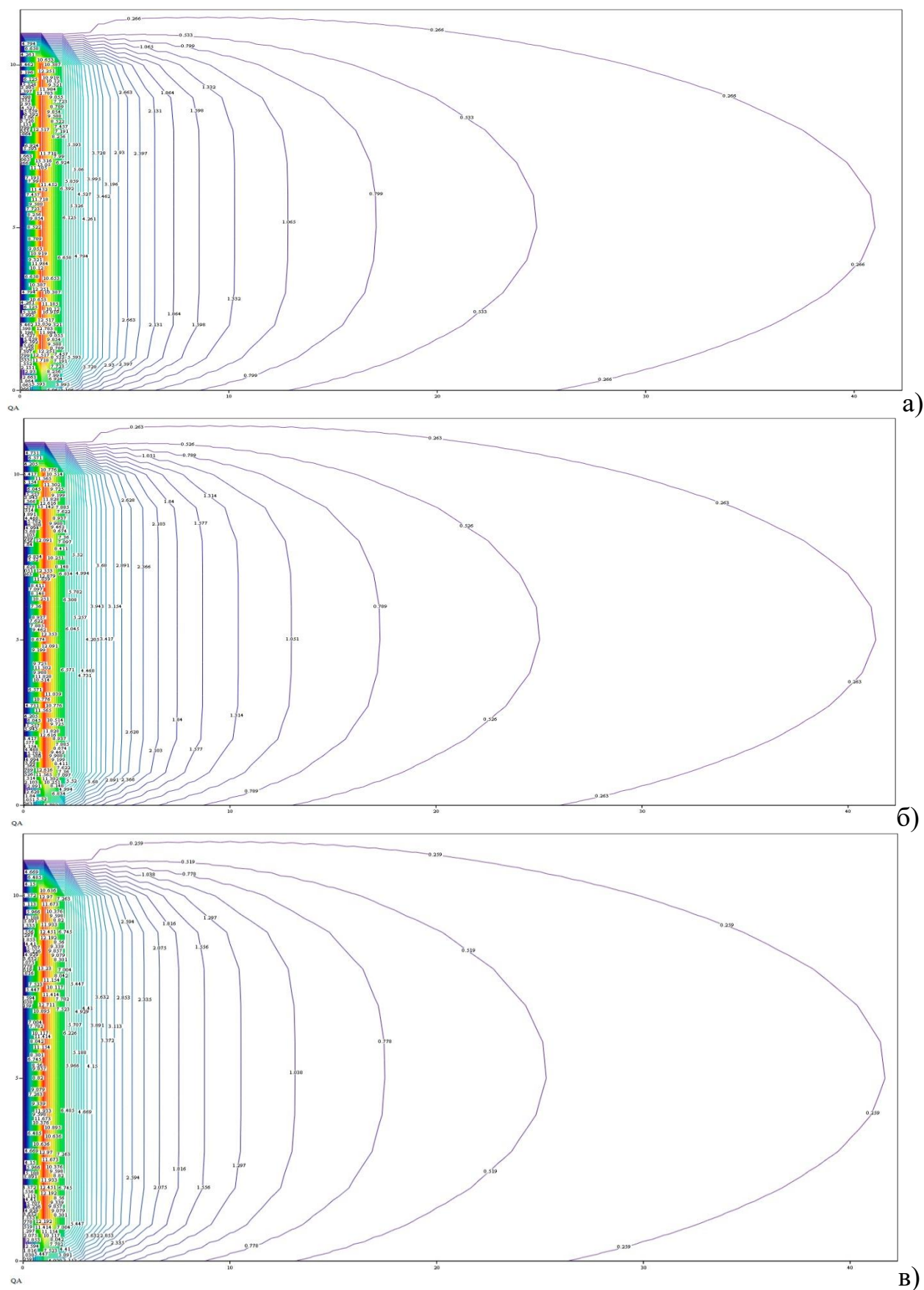


Рисунок 3.1 – Поля дисперсії СО за адресою вул. Борщагівська 117
при середньому вітру в: а) 1 м/с; б) 3 м/с; в) 5 м/с

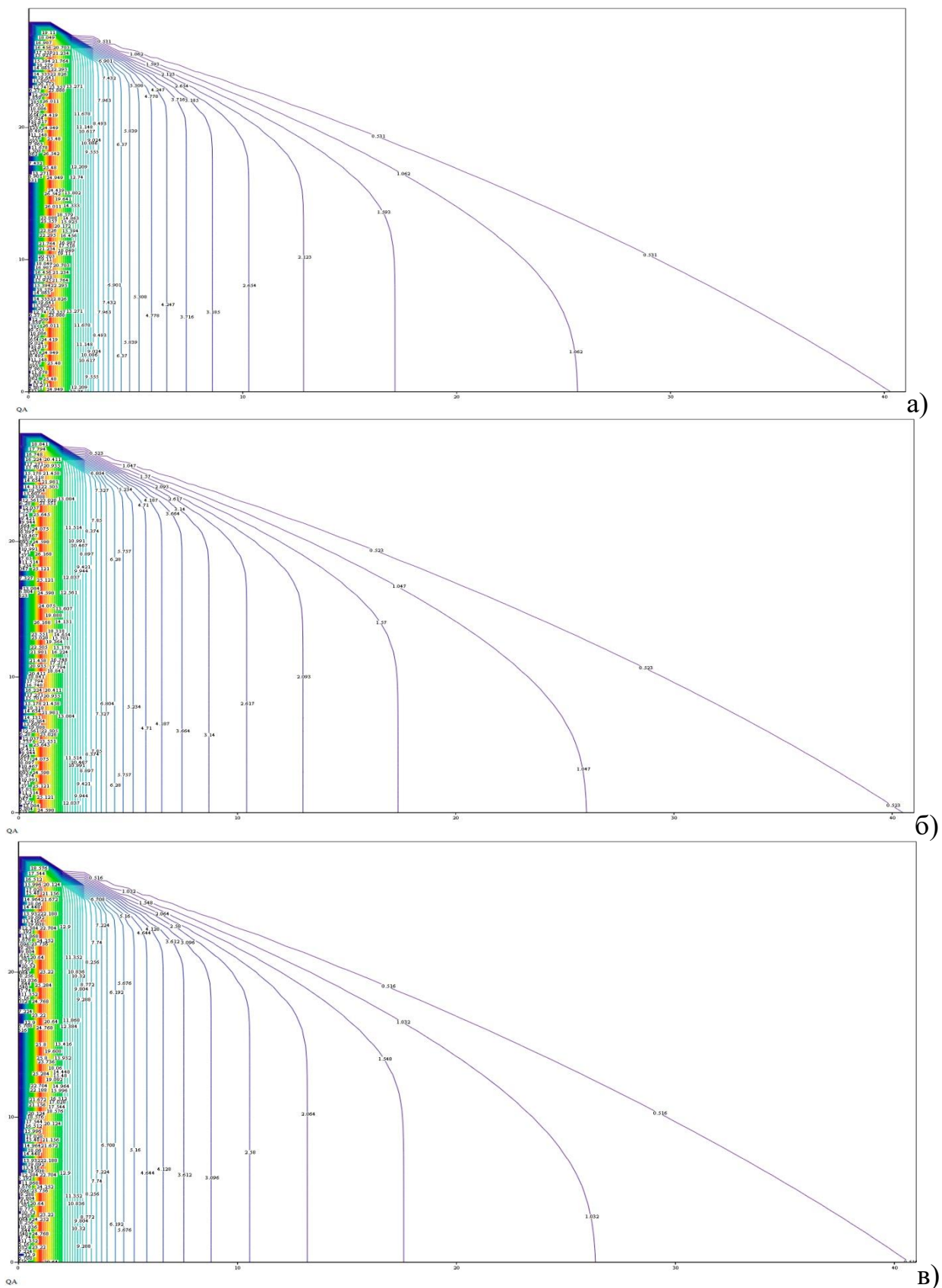


Рисунок 3.2 – Поля дисперсії СО за адресою проспект Перемоги, 45
при середньому вітру в: а) 1 м/с; б) 3 м/с; в) 5 м/с

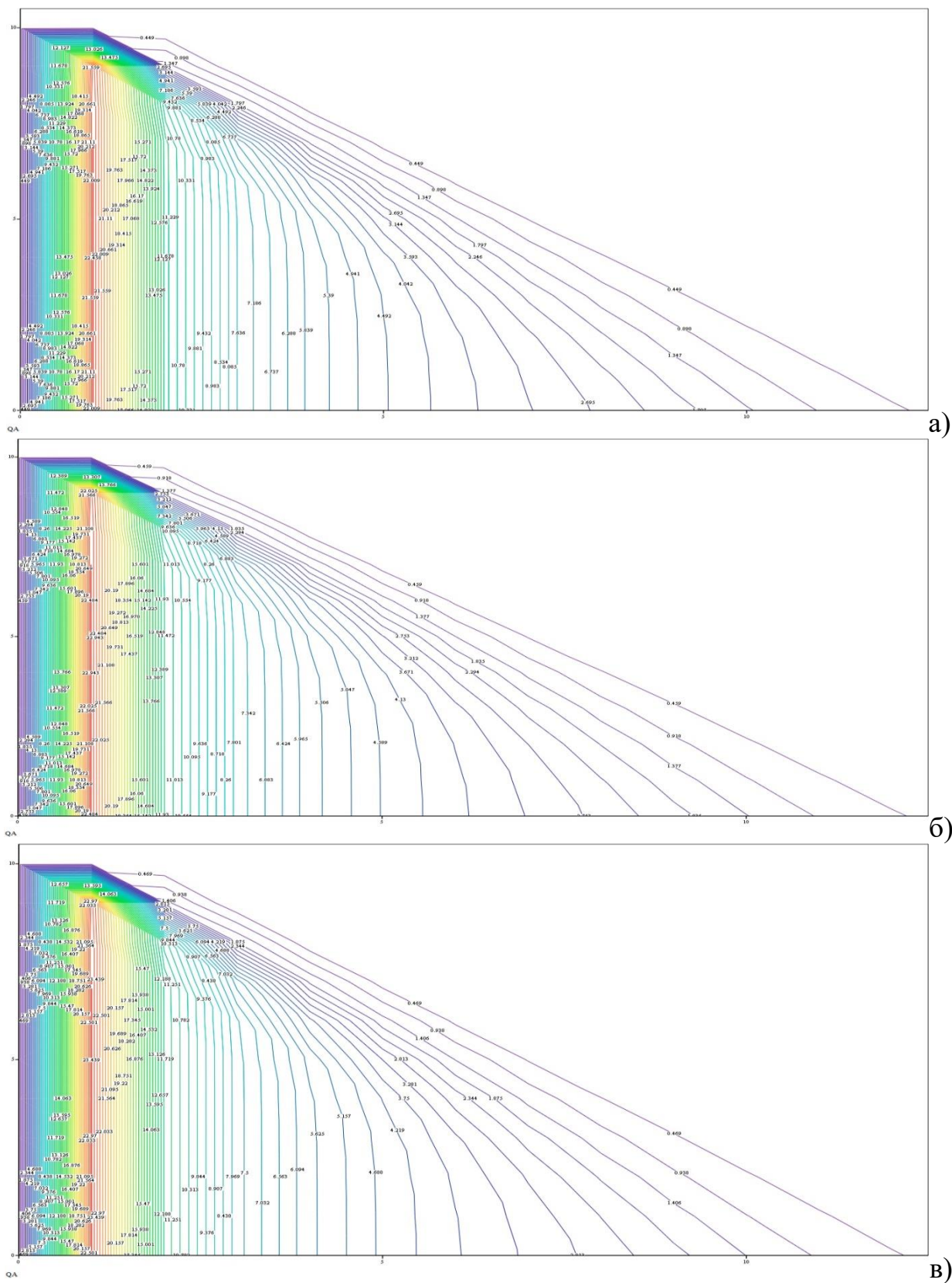


Рисунок 3.3 – Поля дисперсії СО за адресою проспект Перемоги, 60
при середньому вітру в: а) 1 м/с; б) 3 м/с; в) 5 м/с

Рисунок 3.4 – Поля дисперсії NO_x за адресою вул. Борщагівська 117 при середньому вітрі в: а) 1 м/с; б) 3 м/с; в) 5 м/с

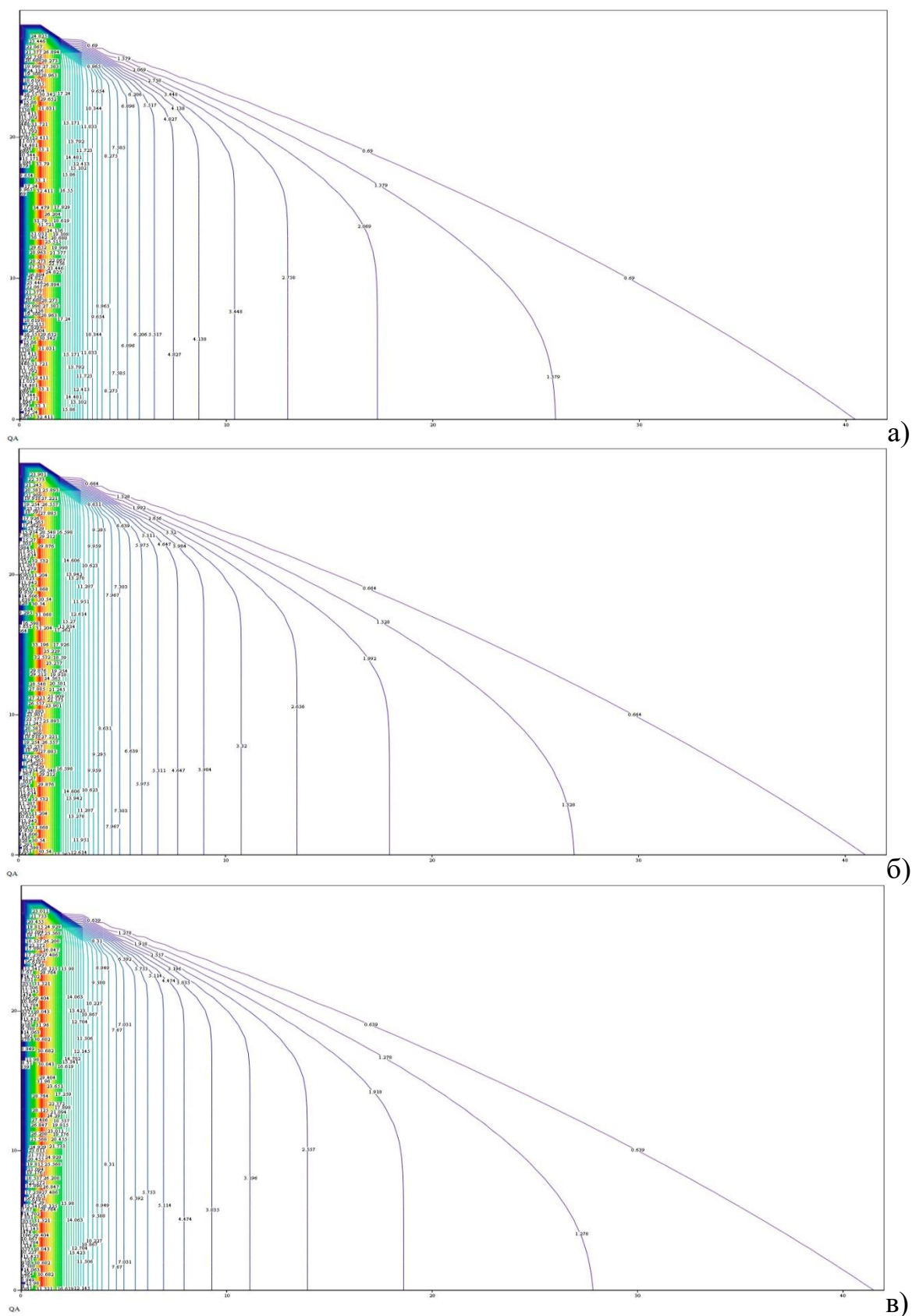


Рисунок 3.5 – Поля дисперсії NO_x за адресою проспект Перемоги, 45 при середньому вітру в: а) 1 м/с; б) 3 м/с; в) 5 м/с

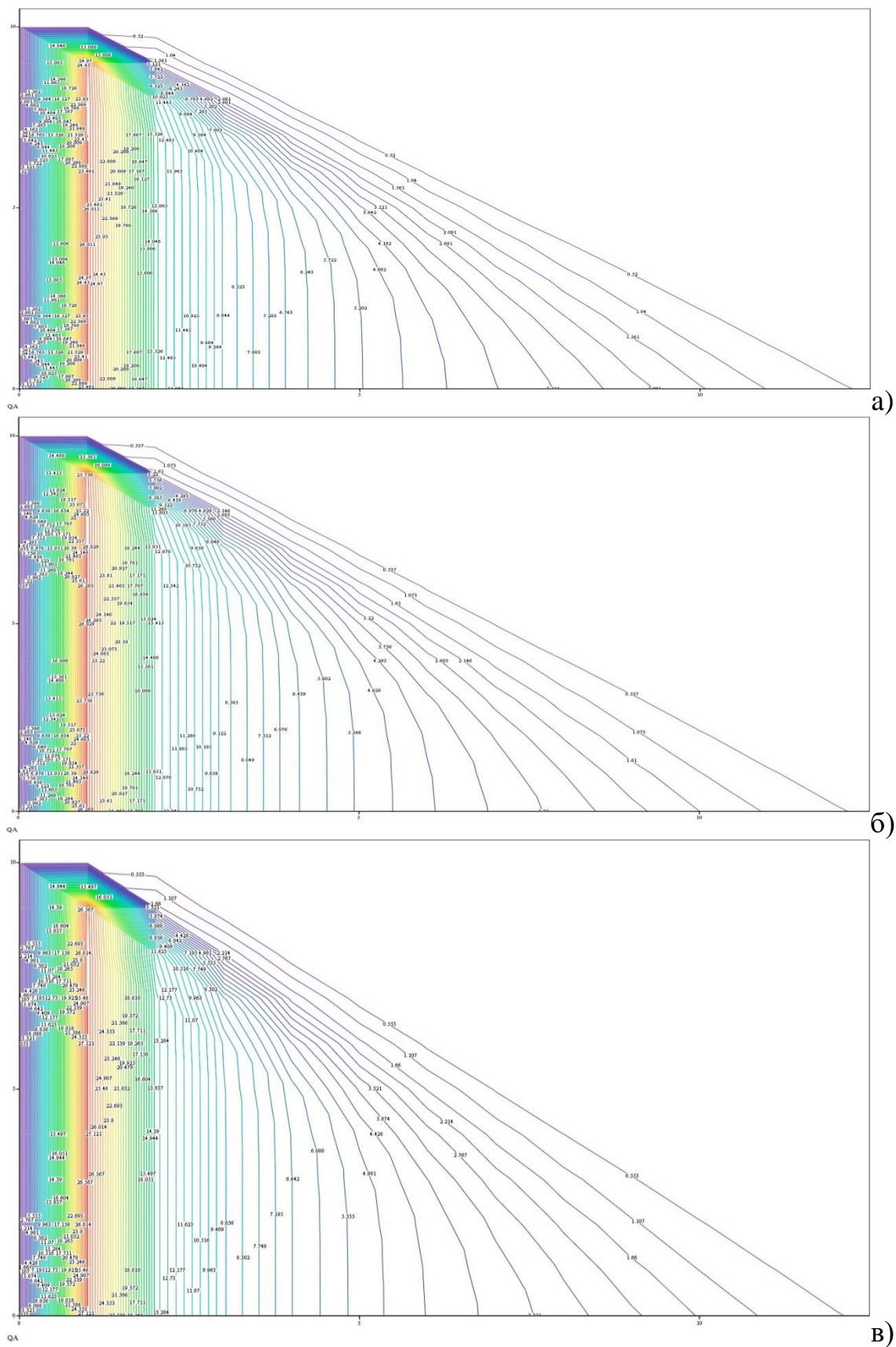


Рисунок 3.6 – Поля дисперсії NO_x за адресою проспект Перемоги, 60 при середньому вітру в: а) 1 м/с; б) 3 м/с; в) 5 м/с

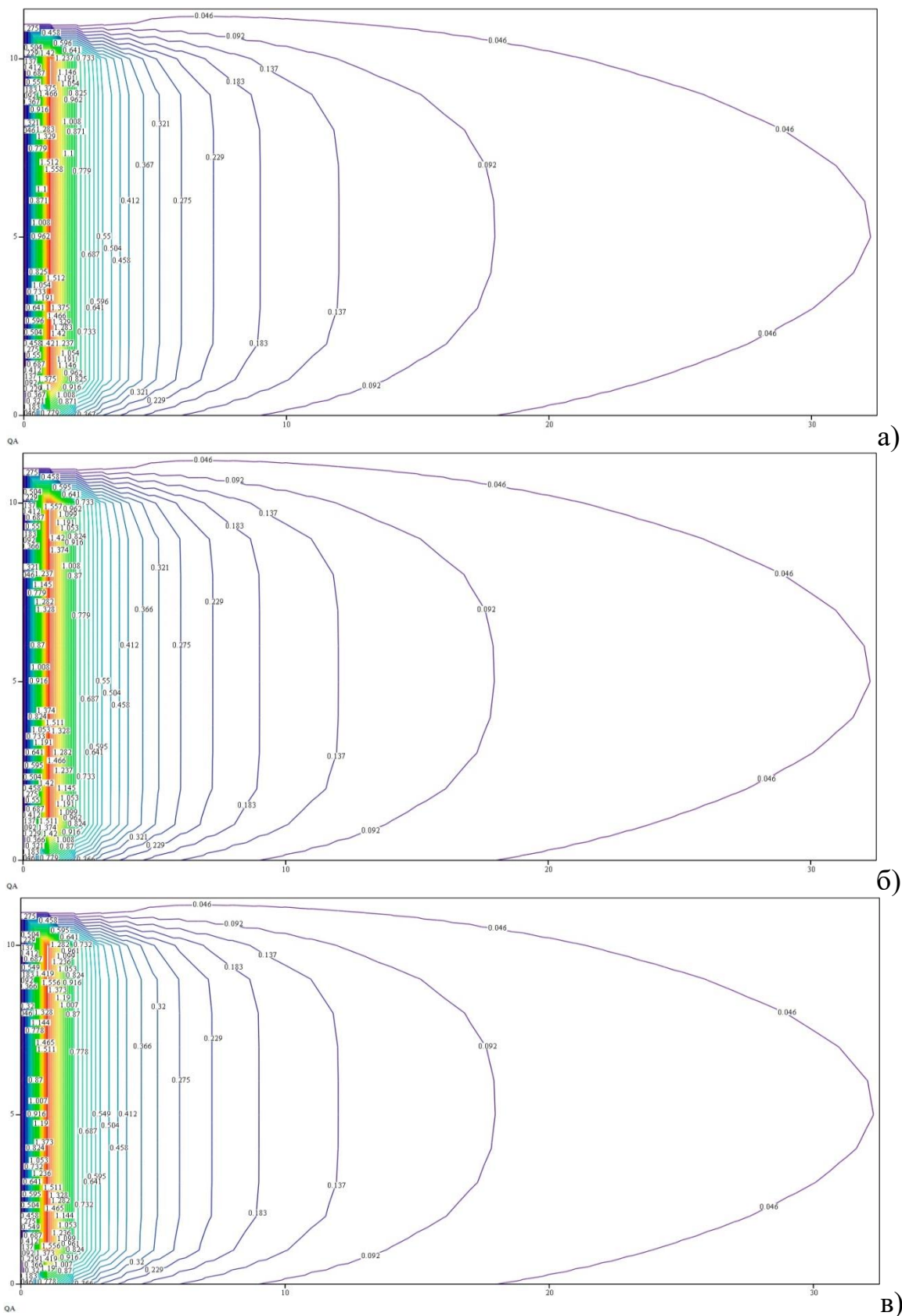


Рисунок 3.7 – Поля дисперсії часток пилу за адресою вул. Борщагівська 117 при середньому вітру в: а) 1 м/с; б) 3 м/с; в) 5 м/с;

потоків і в деяких випадках навіть зниженню величин максимальних приземних концентрацій забруднювачів. Однак за таких умов, як правило, збільшується відстань, на яку розповсюджуються ШР від магістралі [30].

Найбільші кратності збільшення ГДК за полями дисперсії спостерігаються на тротуарах для чадного газу в 26,5 разів (на проспекті Перемоги, 45), для нітроген оксиду 32 рази (на проспекті Перемоги, 45) і для пилу в 3 рази (на проспекті Перемоги, 60).

Просторові моделі цих трьох дворів представлені у вигляді карти рівнів забруднення (рис. 3.10 - 3.15). Слід зазначити що поля дисперсії будувалися при штилі та вітрах до 5 м/с, а моделі дворів при 7-10 м/с. Просторові моделі представлені концентраціями чадного газу та нітроген оксиду, а пил не брався до уваги оскільки він важкий і зазвичай не сильно перелітає у двір.

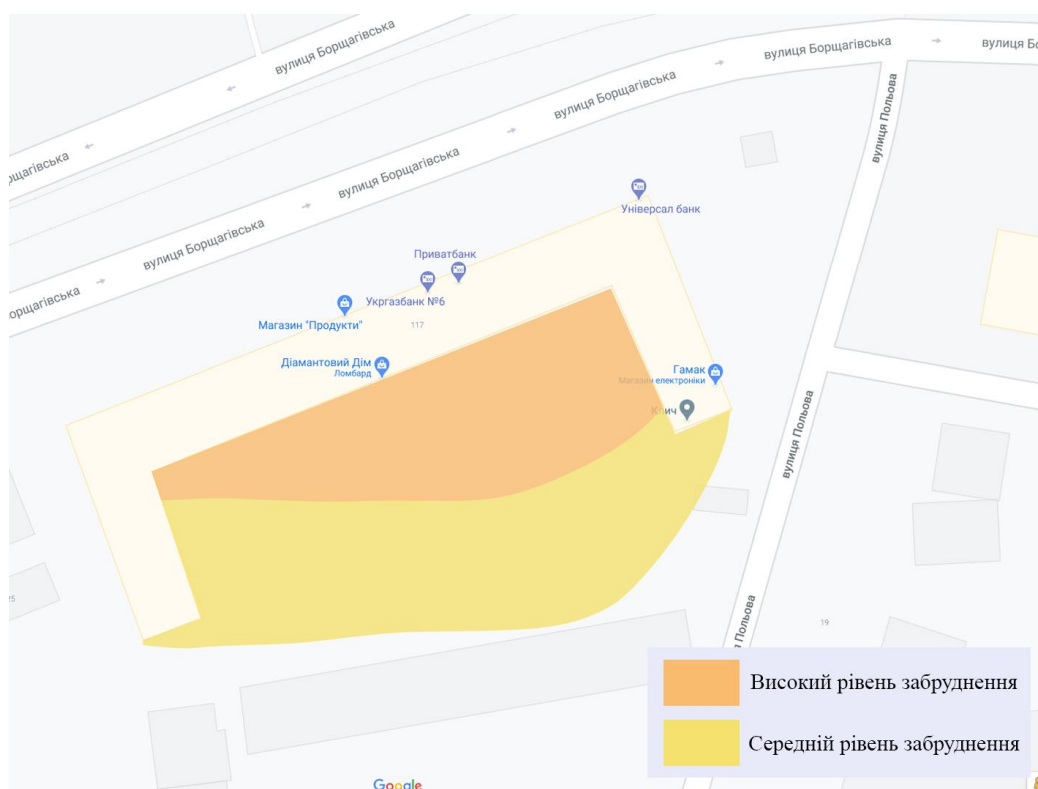


Рисунок 3.10 – Карта забруднення NO_x за адресою вул. Борщагівська 117 при вітру 10 м/с

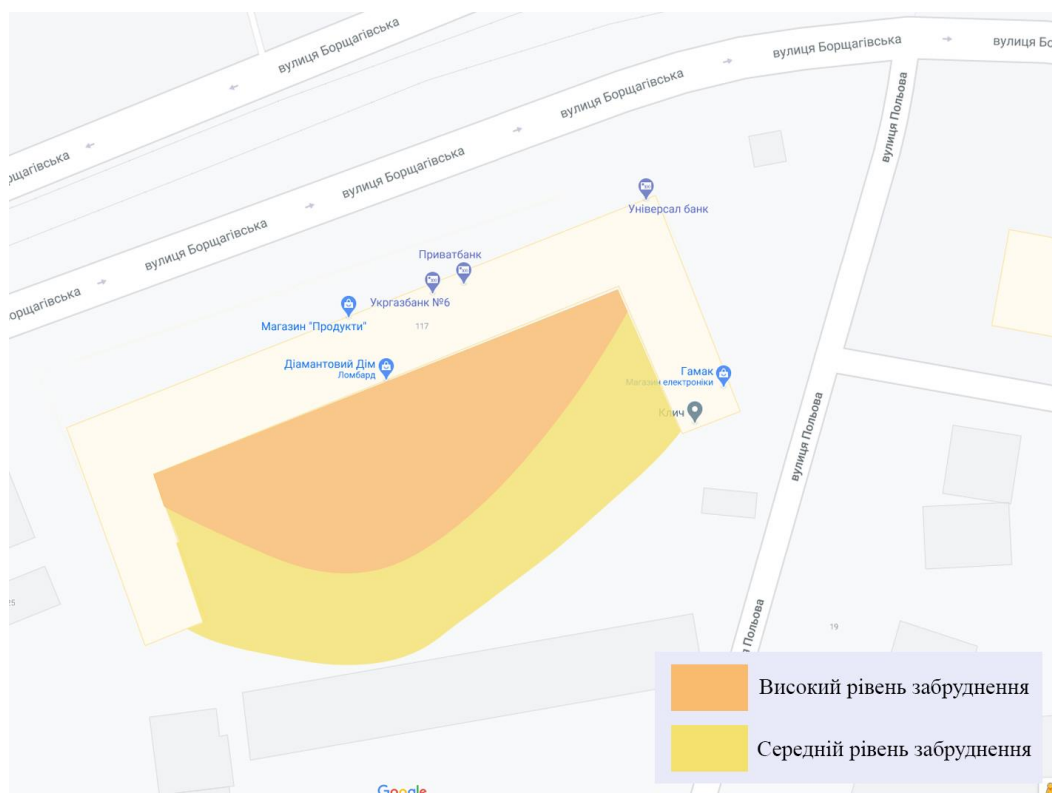


Рисунок 3.11 – Карта забруднення СО за адресою
вул. Борщагівська 117 при вітрі 7 м/с

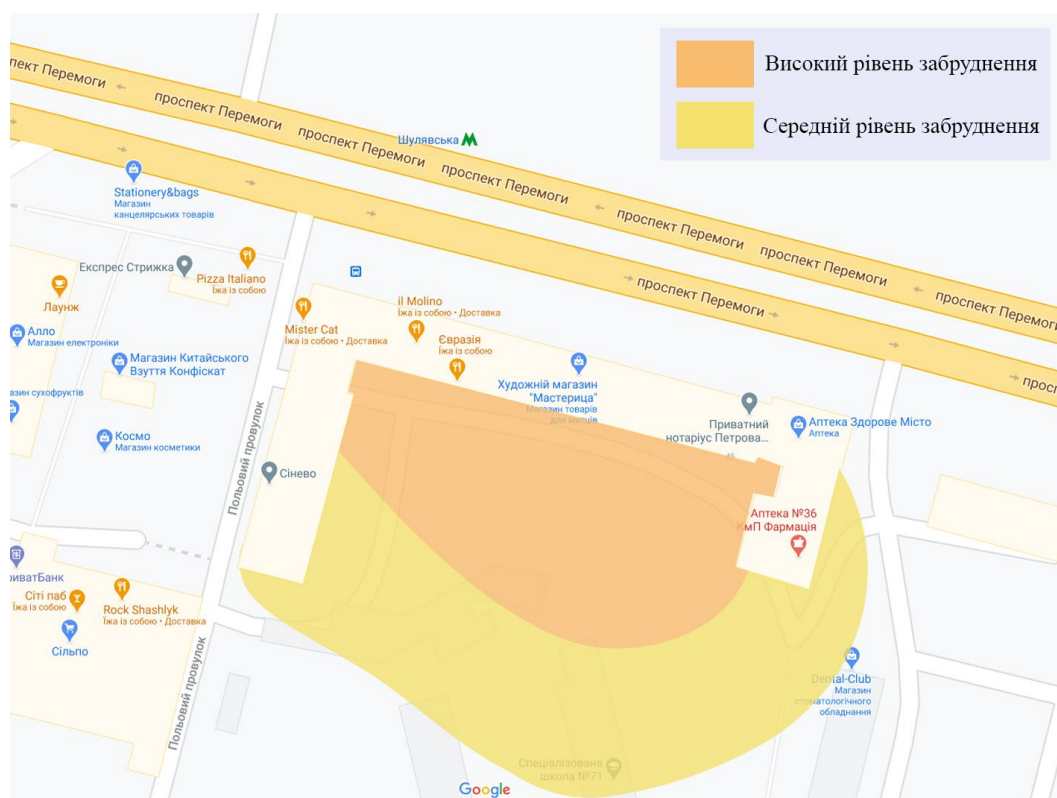


Рисунок 3.12 – Карта забруднення СО за адресою
проспект Перемоги 45 при вітрі 10 м/с



Рисунок 3.13 – Карта забруднення СО за адресою проспект Перемоги 45 при вітрі 7 м/с

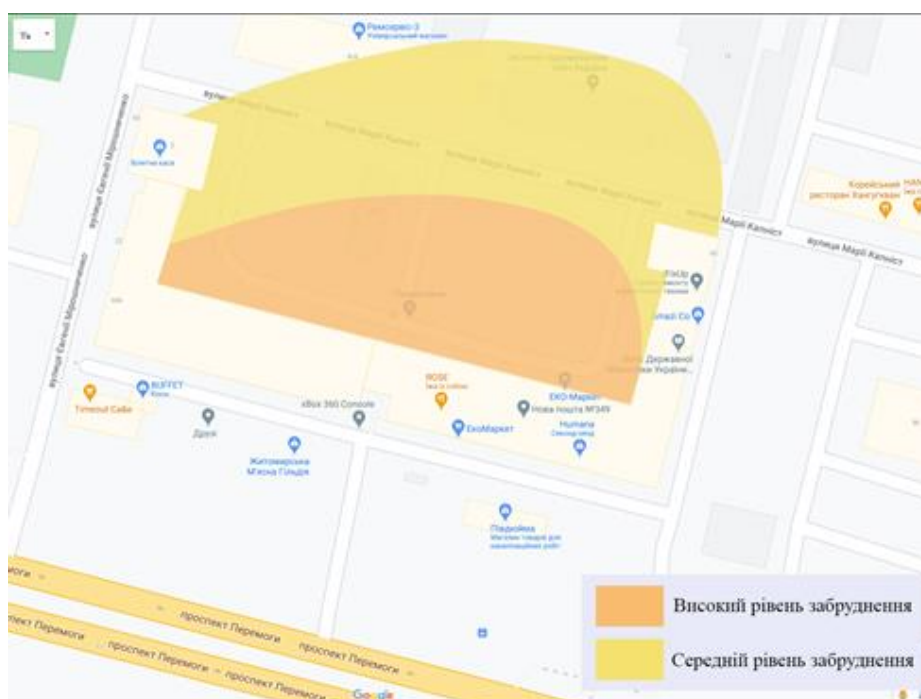


Рисунок 3.14 – Карта забруднення СО за адресою проспект Перемоги 60 при вітрі 5 м/с

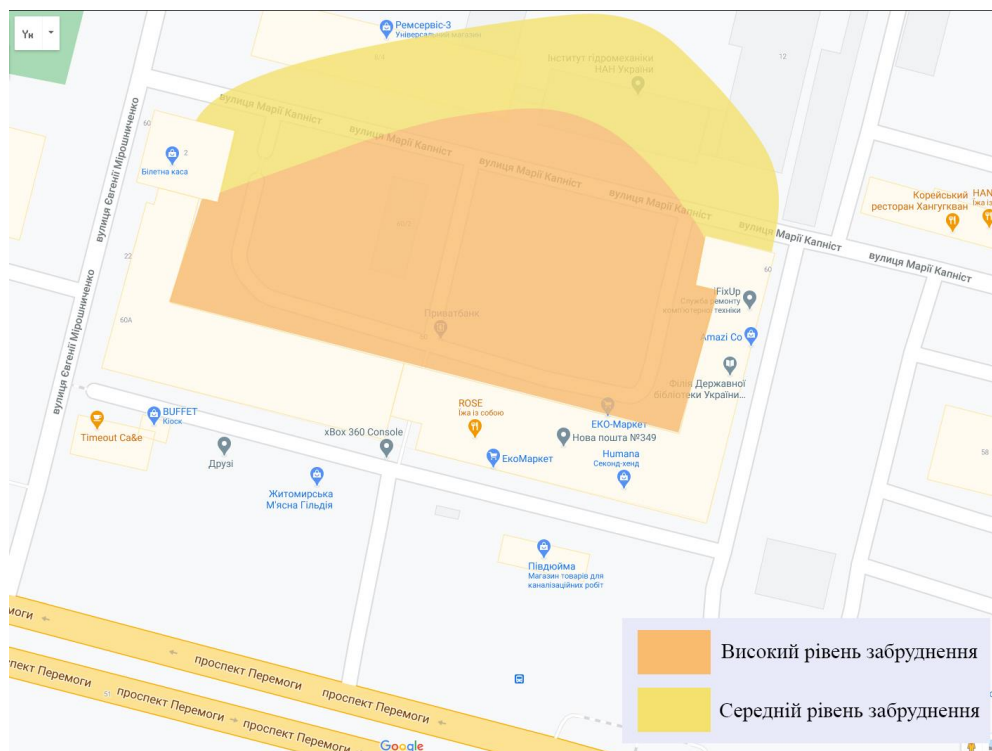


Рисунок 3.15 – Карта забруднення NO_x за адресою проспект Перемоги 60 при вітру 10 м/с

З представлених вище карт забруднення видно, що високий рівень забруднення спостерігається саме в межах частково замкнутих дворів каньйонів. Території розташовані прямо перед будівлями є найбільш небезпечними, вони мають найвищий рівень забруднення. Повітряний потік разом з ШД проникає з прилеглих територій та доріг по напрямку вітру в двір каньйон. Повітряна маса вдаряється об «стіну геометрії каньйону» і накопичує в цих місцях найвищі середні та максимально разові показники ГДК.

Підняття концентрацій функціонально залежить від напрямку вітру. Якщо напрям вітру з прилеглих територій співпадає з входом в каньйон і направлений перпендикулярно до меж каньйону, то при такій ситуації розсіювання є найбільш небезпечним (тому що практично відсутнє) особливо якщо хмара ШД надходить з магістралі, як на проспекті Перемоги 45 (рис. 3.12).

Розповсюдження середнього рівню забруднення залежить від відкритості геометрії каньйону. З моделей видно що в дворах до яких є прилеглі дворові

території, турбулентність потоків зростає і хмари ШД розсіюються значно краще при будь-якій швидкості вітру.

Найбільші вертикальні концентрації спостерігаються в межах 1-3 поверхів, відповідно значно покращують ситуацію з розсіюванням наявних низько поверхові будівлі в складі каньйонів але не вирішують проблему максимально разових перевищень ГДК.

Висновки до розділу 3

1. Найбільша концентрація забрудників спостерігається на 1–3 поверхах, навіть без урахування локації, де розміщена будова. Від висоти 4-го поверху концентрація забрудників зменшується.

2. Факельна модель за Берляндом спрямована на розрахунок можливого розподілу концентрації викидів із максимальним значенням за умов нестійкого (помірного) стану атмосфери протягом 20–30 хвилин.

3. Найбільші кратності збільшення ГДК за полями дисперсії спостерігаються на тротуарах для чадного газу в 26,5 разів, для нітроген оксиду 32 рази і для пилу в 3 рази.

4. Якщо напрям вітру з прилеглих територій співпадає з входом в каньйон і направлений перпендикулярно до меж каньйону, то при такій ситуації розсіювання є найбільш незначним і як наслідок накопичення ШД найбільше.

4 РОЗРОБКА СТАРТАП ПРОЕКТУ ПРОГНОЗУВАННЯ ВПЛИВУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА

4.1 Цілі та етапи реалізації стартап-проекту

Вплив автомобільного транспорту на екологічний стан міста в XXI столітті став найвагомішим. Тому постала гостро проблема в професійному прогнозуванні впливу автомобільного транспорту для того щоб на основі цієї інформації приймати якісь рішення задля контролю і покращення ситуації.

Основа ціль створення стартап проекту це надавання якісних прогнозів та оцінок екологічної ситуації міста. Опис стартап проекту викладений в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї проекту стартапу

Зміст ідеї	Напрями застосування	Вигоди для користувача
1	2	3
<p>Створення консалтингової компанії для прогнозування та оцінки впливу автомобільного транспорту на екологію міста. Прогнози будуть складатися на основі власного програмного забезпечення, яке буде спиратися на ряд математичних моделей.</p> <p>Також в майбутньому планується підхід прогнозування на основі статистики (біг дати) та космічного зондування певних територій.</p>	В державних справах моніторингу та регуляції екологічної ситуації	Віддача на аутсорс оцінки впливу і розробки прогнозів можливих ситуацій
	Громадським та міжнародним організаціям	Незалежний прогноз та незалежна оцінка
	Державним службам статистики	Швидкий доступ до бази даних
	Автовиробникам	Можливість пристосувати виробництво до майбутніх тенденцій. Показ громадським організаціям, що автовиробник також зацікавлений в сприятливій екології.

Продовження таблиці 4.1

1	2	3
	Міським управлінням	Нішевий прогноз по районам, вулицям міста.
	Науковій спільноті	Відача на аутсорс певних розрахунків моделей. Підтвердження або непогодження наукових припущень. Перевірка власних припущень. Доступ до баз даних
	Громадськості	Інформативна

4.2 Аналіз конкурентного середовища

Існує багато еко консалтингових компаній які діють зразу в усіх напрямках від проектно-екологічного консалтингу до оформлення екологічних документів. Всі компанії хочуть захватити весь спектр можливих екологічних задач. Якщо спускатися до більш нішевих напрямках екологічних досліджень, то тут спостерігаються «блакитні океани».

Схожі послуги на ринку України пропонує ТОВ «ЕкоСтарс», ТОВ «Еко центр» але вони не є нішевим, а займаються широким спектром задач. Повна інформація наведена в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Переваги ідеї проекту

№ п/п	Техніко-економічні ідеї	Стартап проект	Екологічний експерт	ЕкоСтарс
1	2	3	4	5
1	Створення публічної бази даних	Створення під це окремої веб платформи	Відсутнє	Відсутнє

Продовження таблиці 4.2

1	2	3	4	5
2	Надання послуг з прогнозу впливу автомобільного транспорту	Націленість на цю нішу. Розробка під це власних моделей, нових технологій, залучення великих потужностей під це.	Загальні результати, які спираються суто на статистику і ріст автотранспорту	Загальні результати, які спираються на минулі результати, консолідація їх.
3	Створення платформи для наукового середовища по підписці	Консолідація біг дати для наукових цілей інститутів	Відсутнє	Відсутнє
4	Незалежна оцінка	Повна незалежність	Часткова залежність від міністерства екології	Повна залежність від міністерства екології, так як фактично вони головні їхні підрядники

Водночас, в ході реалізації стартап-проекту доцільно здійснити SWOT-аналіз потенційних загроз та можливостей реалізації стартап-проекту, визначивши сильні та слабкі сторони, а також його можливості та загрози. SWOT-аналіз не охоплює остаточну інформацію для реалізації стартап-проекту, однак дозволяє упорядкувати процес формування бізнес-ідеї [31]. Проаналізовані сильні і слабкі переваги стартап проекту, які наведені у вигляді SWOT аналізу в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – SWOT аналіз проекту

Фактори	Оцінка середовища		Оцінка підприємства	
	Можливості	Загрози	Можливості	Загрози
1.Залежні від діяльності підприємства: 1.1 Іноваційність підходів 1.2 Якість прогнозів та оцінок 1.3 Професіоналізм команди 1.4 Репутація на ринку 1.5 Цінність пропозиції 1.6 Піар на маркетинг	Збільшення попиту на еко міста. Збільшення проблеми автотранспорту в містах. Створення нових міжурядових згод. Велика сучасна увага до екології. Збільшення загроз екологічних катастроф.	Брак кваліфікованих кадрів. Відхід тренду екологія. Створення великої кількості нішових аналогічних компаній.	Сильна експертиза. Нішевість. Вплив на міжнародні організації. Можливість бути лідером думок. Ймовірність бути авторитетною компанією стосовно екології. Ріст в екосистемний бізнес. Можливість бути першими в даній ніші	На початкових етапах необізнаність. Неавторитетність. Вузька спеціалізація. Нерозуміння цінності послуг. Недовіра до висновків. Брак креативності. Довга розкачка компанії. Не стабільна бізнес модель.
2.Незалежні від діяльності підприємства: 2.1 Інфляція 2.2 Криза та несприятлива ситуація для інвестування в зв'язку з пандемією				

Результати SWOT аналізу по стартап проекту узагальнено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Матриця SWOT-аналізу

Сильні сторони	Слабкі сторони
1. Нішевість 2. Відсутність прямих конкурентів 3. Експертиза	1. Відсутність масового ринку 2. Залежність від урядових та громадських замовлень 3. Складність донесення цінності
Можливості	Загрози
1. Вихід на міжнародний ринок 2. Створення великого впливу в питаннях екології 3. Масштабування в найвпливовішу компанію з питань світової екологічної безпеки	1. Підтягнення крупних корпорацій 2. Нестабільна ситуація в світі 3. Нестача кваліфікованих наукових кадрів 4. Зменшення уваги до впливу автомобільного транспорту

4.3 Ключові види діяльності та ключові партнери

В цьому розділі описано першочергові види діяльності проекту для мінімально життєвого продукту та їхня комерціалізація, табл. 4.5, також визначено ключового партнера, табл. 4.6.

Таблиця 4.5 – Ключові види діяльності

Назва діяльності	Опис діяльності	Результат діяльності
1	2	3
Прогноз впливу автомобільного транспорту для міст	Створюється модель для прогнозування з максимальною кількістю відомої інформації під конкретне місто	Чіткий графічний та математичний прогноз з прив'язкою до геоданих
Оцінка впливу автомобільного транспорту для міст	Проводиться незалежна оцінка впливу екологічного стану на конкретне місто	Чітка незалежна оцінка поточного стану

Продовження таблиці 4.5

1	2	3
Розробка відкритої бази даних	Завдяки накопичення інформації створюються великі бази даних для громадськості та науковців	Веб ресурс доступний кожному по підписці
Створення нових методик та моделей, інновації	Діяльність направлена на створення принципово нових технологій розрахунку	Створення нових моделей, методик розрахунку, нових патентів

Таблиця 4.6 – Перелік партнерів

Інформація	Громадська організація "ЕЗК"
Повна офіційна назва організації-партнера	Громадська організація екологічний захист та контроль
Місце розташування	03179, м. Київ, Святошинський район, вулиця Ірпінська, будинок 63 а, квартира 141
Юридичний статус	Не перебуває в процесі припинення
Офіційна адреса	03179, м. Київ, Святошинський район, вулиця Ірпінська, будинок 63 а, квартира 141
Контактна особа	Сергійчук Віктор Петрович
Телефон	+380638303123
Адреса електронної пошти	ecozacontr@ukr.net
Роль та залученість до підготовки цього проекту	Піар і додаткова креативність
Завдання, які покладаються на організацію партнера в реалізації проекту	Підтримка будь-яких ініціатив зв'язаних на покращення екологічного стану

4.4 Фінансове обґрунтування стартап-проекту

В даному розділі приведений орієнтовний бюджет на запуск стартапу. Цей список не є вичерпним так як на практиці завжди з'являється потреба в різного виду витрат які дуже складно спрогнозувати на початку запуску проекту. Всі витрати узагальнено наведені в табл. 4.5. Так як стартап інтелектуальний основні витрати йдуть на оплату праці.

Таблиця 4.7 - Обґрунтування капіталовкладень на реалізацію проекту

Статті капіталовкладень	Величина, тис. грн.
Прямі одноразові витрати	151
Витрати на потужні комп'ютери	150
Реєстрація суб'єкта господарської діяльності	1
Прямі регулярні витрати (в місяць)	108,2
Оренда дата центру	5
Оренда офісу	15
Оплата інтернету	0,2
Маркетинг	15
Піар	20
Інші офісні витрати	3
Витрати на дослідження та на інноваційні продукти	50
Заробітні плати працівникам	150
Зарплата двох науковців (разом з податками)	80
Проджект менеджер/директор	35
Програміст/data science	35
Всього одноразових капіталовкладень	151
Всього витрат на місяць	258,2
Бюджет на рік	3 249,2

Організаційна форма фізична особа підприємець (ФОП), на єдиному податку без ПДВ. Всіх працівників (їх 3, плюс директор) буде зареєстровано як ФОП. Схема відносин буде контрактна, з ФОП з ФОП, без трудового кодексу, це допоможе зменшити податкове навантаження також працівники самі платять за себе податки, 5% єдиного податку та єдиного соціального внеску (ЄСВ).

4.5 Обґрунтування рівня рентабельності (прибутковості) інноваційної ідеї

Даний стартап має два види прибутку. Самий головний прибуток це прибуток від прямої діяльності консалтингу. А другий вид прибутку від підписки на базу даних інформації про вплив автомобільного транспорту.

Планується брати участь в державних закупівлях та за рахунок піару і маркетингу залучати своїх середніх та великих клієнтів. Оплата послуг компанії розраховується погодинно, виходячи з витрат. На першій порі потрібно увійти на точку беззбитковості, а потім здорожчувати ціну за годину. Пропонується розраховувати вартість одної години послуг проекту з формули:

$$Ц_{\text{год}} = B_p / \Gamma_{\text{роб}} * M, \quad (4.1)$$

де $Ц_{\text{год}}$ – ціна за годину, грн;

B_p – всі річні витрати, грн;

$\Gamma_{\text{роб}}$ – сумарна кількість робочих годин в році, год;

M – додаткова вартість для виходу в рентабельність, %.

Розраховуємо по формулі 4.1:

$$Ц_{\text{год}} = 3249200 / 1920 * 1.15 = 1\,946 \text{ (грн/год)}.$$

Саме за вартості 1946 грн/год проект буде покривати всі свої річні витрати і мати при цьому 15% маржинальності. Умови моделюються виключно

для повної загрузки компанії. Плюс до даної прибутку планується отримувати кошти з підписок на базу даних але змодельювати прибуток від цього доволі складно, тому ним знехтуємо. Публічна база даних буде виконувати роль піару компанії. Кінцеві розрахунки узагальнено в табл. 4.8.

Таблиця 4.8 – Загальне обґрунтування фінансової складової проекту

Статті витрат	Джерело даних	Одиниці вимірювання	Значення показників
Річні витрати	Табл. 4.7	грн	3 249 200
Річний дохід	Формула 4.1*1920	грн	3 736 320
Єдиний податок	Податковий кодекс	%	5
ЄСВ річне	Податковий кодекс	грн	13 200
Річний прибуток	Річний дохід - річні витрати – ЄСВ річне - єдиний податок	грн	287 104

4.6 Вибір цільових груп і потенційних споживачів

Основні цільові групи потенційних споживачів зображено графічно на рис.4.1 і більш детально розписано про сегмент, інтенсивність конкуренції та про простоту входу в табл. 4.9.

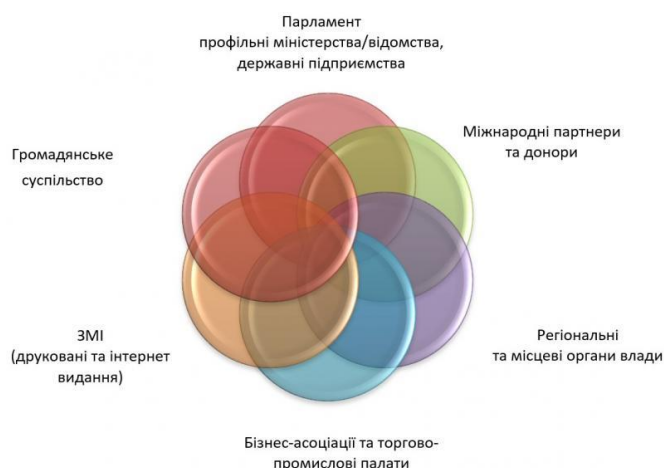


Рисунок 4.1 – Графічне зображення цільових груп споживачів

Таблиця 4.9 – Цільові групи потенційних споживачів

№ п/п	Опис цільової групи потенційних клієнтів	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Профільні державні міністерства/відомства, державні підприємства	(Середній) державні закупівлі	Низька	Низька
2	Міжнародні партнери та донори	(Високий) Гранти, тендера	Висока	Середня
3	Регіональні та місцеві органи влади	(Низький) Нішеві тендера	Низька	Висока
4	Бізнес асоціації та торгово- промислові палати	(Низький) Нішеві тендера	Низька	Висока
5	ЗМІ	(Високий) Інформаційно- консультативні послуги	Середня	Висока
6	Громадське суспільство	(Середній) Інформаційні послуги	Низька	Висока

Основна стратегія розвитку буде направлена на привернення громадськості до проблеми екології міста і тим самим збільшення попиту на прогнозування та оцінки стану сегменту.

4.7 Канали збуту

Всі канали збуту які плануються залучитися для старту стартапу узагальнено в табл. 4.10.

Таблиця 4.10 – Канали збуту

№ п/п	Канал	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник послуги	Оптимальна система збуту
1	Державні закупівлі	Велика кількість бюрократичних процедур	Якісне, наукове професійне моделювання	Через майданчики тендерів
2	Регіональні закупівлі	Нішевість, робота з маленькою вибіркою даних	Точкові моделі	Через співпрацю з об'єднаними громадами, мерами
3	Замовлення незалежних оцінок	Система контролю і перевірок	Показ прозорості розрахунків і проведення прозорого консалтингу	Через партнерів, які будуть підтверджувати також незалежно висновки
4	Консалтинг громадськості	Можливі негативні відгуки, можливе втручання цензури з боку держави	Якісне, наукове професійне моделювання і одразу чіткий недвозначний висновок	Через громадські організації
5	Підписка на базу даних	Низька цікавість, мала кількість наукового середовище	Максимально якісний і цільовий матеріал	Через швидкий сайт

4.8 Бізнес модель проекту

Вся інформація по проекту узагальнено подана як структура бізнес моделі діяльності в табл. 4.11.

Таблиця 4.11 – Структура бізнес моделі діяльності

Ключові партнери 1. Науковий партнер є ГО "ЕЗК". 2. Надаємо свої послуги державним, громадським установам, міжнародним організаціям, науковцям.	Ключові види діяльності Консалтинг, надання доступу до баз даних	Цінність пропозиції 1. Вузька ніша 2. Вплив на ситуацію екології міста 3. Унікальні Власні розробки оцінки та прогнозування.	Взаємовідносини з клієнтами Експертиза в даній ніші, показ професіоналізму	Споживацькі сегменти 1. Профільні державні міністерства/відомства, державні підприємства 2. Міжнародні партнери та донори 3. Регіональні та місцеві органи влади 4. Бізнес асоціації та торгово-промислові палати 5. ЗМІ 6. Громадське суспільство
	Ключові ресурси Інтелектуальні, кваліфіковані кадри, власні кошти, гранти, легкі кредитні кошти		Канали збуту 1. Державні закупівлі 2. Регіональні закупівлі 3. Замовлення незалежних оцінок 4. Консалтинг громадськості 5. Підписка на базу даних	
Структура собівартості 1.Витрати разові (капітальні): 151 000 грн 2.Витрати постійні: 258 200 грн/місяць 3.Витрати змінні залежать від конкретних розробок в межах до 100тис грн.			Потоки надходження доходу Тендера, гранти, підписки на базу, продаж патентів, приватні замовлення.	

4.9 Аналіз ризиків стартап проекту

Даний проект сам по собі практично першопроходець з такою нішевістю. Великі компанії на ринку пропонують подібне але не в такій деталізації. Основні ризики подані нижче.

1. Брак кваліфікованих кадрів. Буде доволі складно знайти гарних науковців в даній сфері. Велика загроза в тому, що спостерігається «відхід умів» в сусідні держави.

2. Відхід тренду екологія. Раніше це здавалося доволі примарним але зараз в умовах пандемії з'ясувалося що вся увага світової спільноти може змінити вектор миттєво.

3. Створення великої кількості нішових аналогічних компаній. В умовах капіталістичного суспільства ніхто не відміняв можливу конкуренцію. Кожний «блакитний океан» в майбутньому стане «червоним».

4. На початкових етапах необізнаність. Як і в будь-якій другій необізнаній справі, великий ризик частих помилок на початку запуску.

5. Неавторитетність. Потрібний час для здобуття авторитетності, яка здобувається не один рік. Загроза в тому що на здобуття авторитетності підуть роки, а ось на втратити її можна миттєво.

6. Вузька спеціалізація. Проект зроблений під конкретні дослідження впливу саме автомобільного транспорту в умовах міста. Ринок даної ніши може бути маленьким.

7. Нерозуміння цінності послуг. Цей ризик найчастіший у всіх проектах. Громадськість просто може не зрозуміти цінність послуг. Тому потрібно активно займатися піаром і маркетингом.

8. Недовіра до висновків. Цей ризик функціонально залежить від авторитетності.

9. Фінансові ризики. В разі недієспроможності бізнес моделі існують ризики втратити всі гроші закладені на бюджет проекту.

4.10 Оцінка ефективності впорядження проекту та пропозиції інвестору

Чиста приведена вартість проекту розраховується по формулі[12]:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{S_t}{(1+i)^t} = \frac{287\,200}{1+0.1} = 261\,090 \text{ грн},$$

де S_t – чистий грошовий потік в період t , грн;

i – процентна ставка дисконтування для року, %;

n – номер останнього періоду.

Співвідношення інвестицій до вартості проекту розраховуємо за наступною формулою:

$$LTC = L_a/C = 2000/3098,2 = 64\%,$$

де L_a – сума капіталовкладень, тис. грн;

C – сума позики, тис. грн.

Простий термін окупності має сягнути максимум 1 року тому, що у розділі 4.5 була обґрунтована ціна за годину виходячи з річних витрат. При повній загрузці консалтингової компанії проста окупність буде:

$$T_{ok} = \Delta\Pi_p / K = 3\,098,2/3\,385,4 = 0.91 \text{ року},$$

де K – всі прибутки проекту, тис. грн;

$\Delta\Pi_p$ – всі витрати проекту, тис. грн.

Коефіцієнт ефективності E розраховуємо по наступній формулі:

$$E = 1/T_{ok} = 1/0,91 = 1,09.$$

Найважливішим показником оцінки економічної ефективності виробничих інвестицій є чиста дисконтова вартість (ЧДВ) [13]:

$$\begin{aligned} \text{ЧДВ} &= -K + \text{ГП}_1 / (1+R) + \text{ГП}_2 / (1+R)^2 + \dots + \text{ГП}_T / (1+R)^T; \\ \text{ЧДВ} &= -600 + 3385,4 / (1+0,1) + 3450 / (1+0,1)^2 + 3700 / (1+0,1)^3 = \\ &= 3077,6 + 2851,2 + 2779,8 = -7100 + 8708,6 = 1608,6 \text{ тис. грн.}, \end{aligned}$$

де R - ставка дисконту, %;

K - інвестиції в засоби автоматизації, тис. грн.

ЧДВ є більшим нуля, тому прийнятність для інвестування в проект є позитивною.

Період окупності проекту (з додатковими капіталовкладеннями) розраховується наступним чином:

$$T_{ok} = K/\text{ГП} = 3\,098,2/3511,8 = 0,88 = 10,5 \text{ місяців.}$$

де ГП – середньорічна величина грошового потоку (економія експлуатаційних витрат) за певний період, тис. грн.

Висновки до розділу 4

1. Даний стартап проект є доволі ризикованим але є можливість заснувати свою нішу на ринку. В основному ризик полягає в тому, що стартап ґрунтується на нішевому екологічному консалтингу, цінність якого доволі складно донести до громадськості. Даний проект можна назвати перспективним та інноваційним.

2. В ХХІ столітті до подібних екологічних проектів надається увага, вони стають трендовими, на цьому можна зіграти. Також сам проект можна масштабувати шляхом завоювання інших вузьких ніш, та створення екосистемного бізнесу, в майбутньому також є можливість створення інших суміжних проектів до цього таких як екологічний аудит, екологічне навчання та інше.

3. Основний бар'єр входження полягає в пошуку кваліфікованих кадрів на яких зможе держатися проект. Проект залежний від фінансової ситуації в цілому. Хоч і фінансування в 3 млн. грн в рік це не великі кошти, все рівно потрібно мати доступ до легких кредитних коштів. В таблиці 4.12 приводяться загальні дані по стартапу.

Таблиця 4.12 – Загальні показники по проекту

Показники	Значення
Разові капіталовкладення, тис. грн.	150
Капіталовкладення на рік, тис. грн	3 098,2
Річний прибуток, тис. грн.	3 385,4
Рентабельність, %	9%
Економічна ефективність	1,09
Період окупності проекту	10,5

ВИСНОВКИ

1. Вуличні каньйони та дворові «колодязі» створюють геометрію ландшафту при якому кардинально змінюються місцеві вітри і внаслідок цього розсіювання поллютантів ускладнюються.

2. Ареали розташовані прямо перед будівлями в умовах розглянутих типів забудов є найбільш небезпечними з точки зору миттєвого підняття концентрацій токсичних речовин для людини.

3. Згідно з побудованими полями дисперсії найбільші кратності збільшення ГДК спостерігаються на тротуарах, для чадного газу в 26,5 разів, для нітроген оксиду 32 рази і для пилу в 3 рази.

4. У повітряному середовищі міст унаслідок великої завантаженості ВДМ і МЗ у вигляді вуличних каньйонів спостерігається гальмування розсіювання шкідливих домішок у повітрі, що спричинює формування локальних зон високої концентрації токсикантів. Встановлено, що масові концентрації ШР у багатьох місцях багаторазово перевищують гранично допустимі значення, а ці зони розташовані на рівні подиху дітей і дорослих.

5. Даний стартап проект є доволі ризикованим але є можливість заснувати свою нішу на ринку. Основний бар'єр входження полягає в пошуку кваліфікованих кадрів на яких зможе держатися проект. Капіталовкладення на рік потрібно 3 098,2 тис грн. Період окупності 10,5 місяці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бакуліч О. О., Олійник Р. В., Самойленко Є. С. Потенційна екологічна небезпека вуличних каньйонів міста. Київ : НТУ, 2015. 26 с.
2. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Київ : Наукова думка, 1997. 367 с.
3. Azwadi C.S. International Journal of Mechanical and Materials Engineering: Saqr Effects of buildings aspect ratio, wind speed and wind direction on flow structure and pollutant dispersion in symmetric street canyons. Washington : WNI, 2014. 165 с.
4. Бакуліч О.О., Олійник Р.В., Самойленко Є.С. Екологічна стійкість : навч. посіб. Київ : НТУ, 2013. 28 с.
5. Данчук В.Д., Олійник Р.В., Самойленко Є.С. Ранжування структурних елементів вулично-дорожньої мережі за допомогою індексного методу : навч. посіб. Київ : НТУ, 2012. 76 с.
6. Бахарєв В. С., Корцова О. Л., Костиця В. В., Маринін Д. В. Дослідження стану забруднення атмосферного повітря в умовах змін сучасної забудови населених міст. Екологічна безпека. Кременчук : КрНУ ім. М. Остроградського, 2012. С. 43–47.
7. Нутерман Р.Б., Старченко А.В. Моделирование распространения загрязнения воздуха в уличном каньоне : навч. посіб. Одеса : СФА, 2005. 653 с.
8. Балакін В. В. Регулирование аэрационного режима уличных каньонов приёмами планировки и застройки. Москва : МГСУ, 2014. 15 с.
9. Кофанова О.В. Забруднення дворових територій через «колодязну» міську забудову : тези доп. всеукр. наук.-практ. конф. (м. Київ, 7 трав. 2020 р.). Київ, 2020. С. 379–382.
10. Heerden, j., Sullivan, P. The application of CFD for evaluation of dust suppression and auxiliary ventilating systems, Proceedings of the Sixth U.S.Mine Ventilation Symposium. Littleton : CO, 1993. 479 с.

11. Drivas S., Chang, J. Guidelines for use of Vapor Cloud Dispersion Models. New York : NM, 2019. 102 с.
12. Maliupolos H. Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models Copenhagen, European Environment Agency. Athens : REF, 1996. 19 с.
13. Бизова Н. Л. Методическое пособие по расчету рассеяния примесей в пограничном слое атмосферы : монографія. Гомель : Госстройиздат, 1989. 32 с.
14. Скорер Р. Аэродинамика окружающей среды: монографія. Москва : Мир, 2012. 550 с.
15. Осовський С. Нейронные сети для обработки информации: конспект лекцій. Варшава : СТВ, 202. 442 с.
16. Андреев П. И. Рассеяние в атмосферном воздухе газов, выбрасываемых промышленными предприятиями : монографія. Гомель : Госстройиздат, 1990. 88 с.
17. Ложкин В. Н. Управление экологической безопасностью автомобильного транспорта: монографія. Гамбург : ЛАП, 2013. 195 с
18. Зятнін В.І., Пермінов В.А., Самойлова Т.С. Математическое моделирование генерации, распространения и оседания загрязняющих примесей в окрестности автомобильных дорог : навч. посіб. Томск : ТГУ, 2016. 338 с.
19. Тасейко, О.В. Моделирование пространственного распределения загрязнителей от автотранспорта в условиях городской застройки. Запоріжжя : ЗНУ, 2004. 185 с.
20. Курбацький А.Ф., Курбацька Л.І. Моделирование вертикальной структуры ночного пограничного слоя над шероховатою поверхністю : навч. посіб. Новосибірськ : Наука, 2009. Т. 21. С. 315.
21. Лоева І. Д. Оцінка стану забруднення атмосферного повітря великого міста : навч. посіб. Одеса : Екологія, 2010. 220 с.
22. Кравченко О.П. Можливості використання нечіткої логіки при прогнозуванні автомобільного впливу на навколишнє середовище : монографія. Київ : ЖДТУ, 2012. С. 88 – 93.

23. Деркач Ф. А. Хімія : навч.-метод. посіб., Харків : ХПІ, 1968. 295 с.
24. Боярчук В. М. Чад, чадний газ, окис вуглецю, СО. *Термінологічний словник-довідник з будівництва та архітектури* / ред. Р. А. Шмига. Львів, 2010. С. 210.
25. Велика українська енциклопедія / редкол.: А. М. Киридон та ін. Київ : АКЦ, 2016. Т. 1. 592 с.
26. Мала гірнича енциклопедія / редкол.: В. С. Білецького та ін. Донецьк : СВД, 2004. Т. 3. 712 с.
27. Берлянд М. Е. Сучасні проблеми атмосферної дифузії і забруднення атмосфери : навч.-метод. посіб., Москва : Гідрометеоіздат, 1975. – 448 с.
28. Берлянд М. Е. Прогноз і регулювання атмосфери : навч.-метод. посіб., Москва : Гідрометеоіздат, 1985. 272 с.
29. Холоднов В. А, Решетиловский В. П., Лебедева М. Ю. Системный анализ и принятие решений. Компьютерное моделирование и оптимизация объектов химической технологии в Mathcad и Excel : навч.-метод. посіб., Санкт-Петербург : СПбГТИ, 2007. 425 с.
30. Кофанов О. Є. Підвищення екологічної безпеки придорожніх територій міста модифікацією складу і властивостей дизельного палива: дис. ... канд. тех. наук : 21.06.01. Київ, 2018. 324 с.
31. Шевчук Н.А., Зайченко С.В., Кривда О.В. Впровадження та реалізація стартап проекту геомехатронного комплексу. Сучасні проблеми економіки і підприємництво. Київ : КПІ імені Сікорського, 2018. С. 94-101.