

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку

Кафедра екології та менеджменту довкілля

До захисту допущено

Кафедрою екології та менеджменту довкілля протокол № _____ від _____

В.о. завідувача кафедри _____ Андрій АЧАСОВ
(підпис) (ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2025 р.

Кваліфікаційна робота
здобувача _____ Дар'ї ЛЕУРДИ другого рівня вищої освіти
(першого (бакалаврського) / другого (магістерського))

Екологічна оцінка ефективності зеленої інфраструктури міста Лодзь у контексті
адаптації до кліматичних змін
(назва роботи)

Спеціальність (спеціалізація) _____ 101 Екологія
(код та найменування спеціальності; спеціалізації спеціальності - за наявності)

Освітня програма _____ Екологія та охорона навколишнього середовища
(назва освітньої програми)

Виконавець _____ Дар'я ЛЕУРДА
(підпис) (ім'я, прізвище)

Науковий керівник _____ Іветта КРИВИЦЬКА
(підпис) (ім'я, прізвище)

Харків – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ імені В. Н. КАРАЗИНА

Навчально-науковий інститут екології, зеленої енергетики та сталого розвитку
Кафедра екології та менеджменту довкілля
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) магістр
Спеціальність 101 Екологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ / проф. Андрій АЧАСОВ
підпис ім'я та прізвище

“ 5 ” травня 2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЕКТ)

Дар'ї ЛЕУРДІ

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи Екологічна оцінка ефективності зеленої інфраструктури міста Лодзь у контексті адаптації до кліматичних змін

керівник роботи Іветта КРИВИЦЬКА, канд. біол. наук, доцент
(ім'я, прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від “ ___ ” _____ 20__ року № _____

2. Строк подання студентом роботи _____ 01 грудня 2025 р. _____

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1. Проаналізувати теоретичні підходи до оцінки зеленої інфраструктури та її ролі в адаптації до кліматичних змін.
2. Провести інвентаризацію та просторовий аналіз елементів зеленої інфраструктури за допомогою ГІС-технологій і супутникових даних.
3. Оцінити екологічну ефективність зелених зон за індикаторами стану рослинності (NDVI), площі, фрагментації та зв'язності.
4. Зробити SWOT-аналіз зеленої інфраструктури м. Лодзь.

5. Визначити внесок зеленої інфраструктури у кліматичну стійкість міста.

6. Розробити рекомендації щодо удосконалення зеленої інфраструктури як інструменту адаптації до кліматичних змін.

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Сучасний стан досліджень з адаптації міст до зміни клімату
2	Матеріал та методи дослідження зеленої інфраструктури м. Лодзь
3	Аналіз дослідження зеленої інфраструктури м. Лодзь
4	Рекомендації щодо підвищення стійкості міського середовища до кліматичних змін

5. Дата видачі завдання 17.05.2025 р.

Студент _____
підпис

Дар'я ЛЕУРДА
ім'я і прізвище

Керівник роботи _____
підпис

доц. Іветта КРИВИЦЬКА
посада, ім'я і прізвище

АНОТАЦІЯ

**ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗЕЛЕНОЇ
ІНФРАСТРУКТУРИ МІСТА ЛОДЗЬ У КОНТЕКСТІ АДАПТАЦІЇ ДО
КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН**

Дар'я ЛЕУРДА

Кваліфікаційна робота «Екологічна оцінка ефективності зеленої інфраструктури міста Лодзь у контексті адаптації до кліматичних змін» містить 38 сторінок, 4 розділи, 5 рисунків, 4 таблиці, 21 використаних джерел.

Мета роботи: провести екологічну оцінку ефективності зеленої інфраструктури м. Лодзь та визначити її роль у процесах кліматичної адаптації міського середовища

Актуальність теми. Лодзь є показовим прикладом міста, який активно впроваджує заходи з екологічної модернізації та кліматичної адаптації. Проте швидка урбанізація, ущільнення забудови та втрати зелених зон зумовлюють необхідність оцінки ефективності вже існуючої зеленої інфраструктури. Саме тому постає потреба у проведенні екологічної оцінки ефективності системи зелених насаджень Лодзі з урахуванням їх ролі у зниженні кліматичних ризиків.

Завдання. Проаналізувати теоретичні підходи до оцінки зеленої інфраструктури та її ролі в адаптації до кліматичних змін. Провести інвентаризацію та просторовий аналіз елементів зеленої інфраструктури за допомогою ГІС-технологій. Зробити SWOT-аналіз зеленої інфраструктури м. Лодзь.

Методи. Геоінформаційний аналіз, SWOT-аналіз.

Результати. Аналіз показав, що зелена інфраструктура Лодзі має високий потенціал адаптації до кліматичних змін, проте її ефективність обмежується нерівномірним розподілом, старінням посадок та зростанням антропогенного навантаження. Але місто може значно підвищити свою кліматичну стійкість через розширення зелених зон, оновлення дерев, створення екокоридорів та інноваційних форм озеленення (зелені дахи, вертикальне озеленення).

ЗЕЛЕНА ІНФРАСТРУКТУРА, ІНДЕКС NDVI, SWOT-АНАЛІЗ, КЛІМАТИЧНІ ЗМІНИ

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF THE GREEN INFRASTRUCTURE OF THE CITY OF Łódź IN THE CONTEXT OF ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE

Daria LEURDA

The qualification work "Environmental assessment of the efficiency of the green infrastructure of the city of Łódź in the context of adaptation to climate change" contains 38 pages, 4 sections, 5 figures, 4 tables, 21 sources used.

Purpose: to conduct an environmental assessment of the efficiency of the green infrastructure of the city of Łódź and determine its role in the processes of climate adaptation of the urban environment

Relevance. Łódź is an illustrative example of a city that is actively implementing measures for ecological modernization and climate adaptation. However, rapid urbanization, building density and loss of green areas necessitate an assessment of the efficiency of the existing green infrastructure. That is why there is a need to conduct an environmental assessment of the effectiveness of the green space system in Łódź, taking into account their role in reducing climate risks.

Tasks. To analyze theoretical approaches to assessing green infrastructure and its role in adapting to climate change. To conduct an inventory and spatial analysis of green infrastructure elements using GIS technologies. To conduct a SWOT analysis of the green infrastructure of Łódź.

Methods. Geoinformation analysis, SWOT analysis.

Results. The analysis showed that the green infrastructure of Łódź has a high potential for adapting to climate change, but its effectiveness is limited by uneven distribution, aging of plantings and increasing anthropogenic load. But the city can significantly increase its climate resilience through the expansion of green areas, tree renewal, creation of eco-corridors and innovative forms of greening.

GREEN INFRASTRUCTURE, NDVI INDEX, SWOT ANALYSIS, CLIMATE CHANGE

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1_СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ З АДАПТАЦІЇ МІСТ ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ.....	9
1.1. Кліматичні виклики для сучасних міст.....	9
1.2. Вплив кліматичних змін на екологічний стан міста Лодзь ю.....	11
РОЗДІЛ 2_МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ М. ЛОДЗЬ.....	17
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ М. ЛОДЗЬ.....	21
РОЗДІЛ 4 РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА ДО КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН.....	34
ВИСНОВКИ.....	36
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37

ВСТУП

Сучасні тенденції урбанізації та зміни клімату створюють серйозні виклики для сталого розвитку міст. Підвищення середньорічних температур, збільшення частоти посух, зливових дощів і утворення міських «островів тепла» зумовлюють необхідність впровадження ефективних природоорієнтованих рішень. Одним із ключових інструментів адаптації міських територій до кліматичних змін є зелена інфраструктура, яка поєднує природні та напівприродні елементи міського простору — парки, сквери, зелені коридори, водні об'єкти, зелені дахи тощо.

Зелена інфраструктура виконує багато функцій, зменшує ризики перегріву міського середовища, сприяє акумуляції дощових вод, підтримує біорізноманіття, покращує якість повітря та формує сприятливі умови для життя населення. В Європейському Союзі концепція Green Infrastructure розглядається як основа реалізації кліматичної політики та частина Nature-based Solutions (NbS) - рішень, заснованих на природі.

Місто Лодзь (Польща) є показовим прикладом постіндустріального центру, який активно впроваджує заходи з екологічної модернізації та кліматичної адаптації. Проте швидка урбанізація, ущільнення забудови та втрати зелених зон зумовлюють необхідність оцінки ефективності вже існуючої зеленої інфраструктури. Саме тому постає потреба у проведенні екологічної оцінки ефективності системи зелених насаджень Лодзі з урахуванням їх ролі у зниженні кліматичних ризиків.

Об'єкт дослідження: зелена інфраструктура міста Лодзь (Польща).

Предмет дослідження: екологічна ефективність зеленої інфраструктури в контексті адаптації міста до кліматичних змін.

Мета дослідження:

Провести екологічну оцінку ефективності зеленої інфраструктури м. Лодзь та визначити її роль у процесах кліматичної адаптації міського середовища.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати теоретичні підходи до оцінки зеленої інфраструктури та її ролі в адаптації до кліматичних змін.
2. Визначити природно-географічні, кліматичні та урбаністичні особливості м. Лодзь.
3. Провести інвентаризацію та просторовий аналіз елементів зеленої інфраструктури за допомогою ГІС-технологій і супутникових даних.
4. Оцінити екологічну ефективність зелених зон за індикаторами стану рослинності (NDVI), площі, фрагментації та зв'язності.
5. Зробити SWOT-аналіз зеленої інфраструктури м. Лодзь.
6. Визначити внесок зеленої інфраструктури у кліматичну стійкість міста.
7. Розробити рекомендації щодо удосконалення зеленої інфраструктури як інструменту адаптації до кліматичних змін.

Методи дослідження:

Застосовано методи системного аналізу, геоінформаційного аналізу, розрахунку індексу NDVI за супутниковими знімками Sentinel-2, а також методи статистичного узагальнення та SWOT-аналізу.

Отримані результати можуть бути використані міськими органами влади, екологічними службами та урбаністами для вдосконалення планування міського простору, розробки програм сталого розвитку та реалізації природоорієнтованих рішень у політиці адаптації до зміни клімату.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ З АДАПТАЦІЇ МІСТ ДО ЗМІНИ КЛІМАТУ

1.1. Кліматичні виклики для сучасних міст

Існує загальна думка, що за останнє століття температура у більшості регіонів світу підвищилася. З початку XXI століття температура у світі зросла приблизно на $0,6^{\circ}\text{C}$, а з 1970-х років відзначається зростання на $0,4^{\circ}\text{C}$. Важливо відзначити, що в Оціночній доповіді Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) за 2007 рік говориться, що в період з 1970 до 2004 року викиди парникових газів збільшилися на 70 відсотків. Зміна клімату вплине на фізичні та біологічні явища та процеси у просторовому та тимчасовому масштабах. Негативні наслідки будуть відчуватися щодо змін у біорізноманітності, якості повітря, поширенні та стійкості дикої рослинності, воді, повенях, рівні моря, а також поширенні та масштабах лісових пожеж [1].

Зміна клімату вже помітно впливає на клімат Європи [2], і навіть Великобританії [3]. До 2050 моделі припускають, що в Лондоні буде спостерігатися близький до середземноморського клімат, аналогічний тому, який в даний час спостерігається в Бордо на південному заході Франції. На додаток до фонових змін клімату очікується посилення ефекту міських островів тепла як прямого результату температур, що постійно зростають, особливо влітку, що може призводити до загроз для здоров'я людини та благополуччя в навколишньому середовищі.

З глобальним потеплінням екстремальні погодні та кліматичні явища будуть частішими, в той же час процес урбанізації прискорюється, зміна клімату та ефекти урбанізації стають все більш переплетеними та сполученими. Міста стають основними зонами ризику зміни клімату [4]. Ряд факторів ризику, пов'язаних зі зміною клімату, становлять серйозну загрозу безпеці міст. Негативний вплив зміни клімату серйозно загрожує безпеці та сталому розвитку

міст. Постійне зростання населення в швидко урбанізованих районах посилює вразливість міст до клімату та послаблює їхню стійкість до кліматичних катастроф.

Боротьба зі зміною клімату є пріоритетом для Європейського союзу, який поставив амбітні короткострокові та довгострокові цілі зі скорочення викидів парникових газів на 20% до 2020 року, 40% до 2030 року та 80% до 2080 року, порівняно з 1991 роком [5]. Досягнення цих цілей збільшить ймовірність того, що мети Паризької угоди відповідно до Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату можуть бути досягнуті. Головна мета Паризької угоди полягає в тому, щоб утримати зростання глобальної температури в цьому столітті значно нижче 2 °С понад доіндустріального рівня. Крім того, угода спрямована на зміцнення спроможності країн боротися із наслідками зміни клімату.

Міста відіграють найважливішу роль у пом'якшенні наслідків зміни клімату та адаптації до нього [6, 7]. Це особливо актуально для Європи, де близько 74% населення проживає у міських районах. Багато праць присвячені тому як і чому міста беруть участь у кліматичній політиці [8, 9].

Просторове планування як важливий інструмент для координації міського просторового планування, оптимізації просторової форми, організації землекористування та розміщення інфраструктури є основним засобом для адаптації міст до зміни клімату. Однак все ще існують відмінності у пізнанні та практиці щодо ефективності та здійсненності просторового планування в адаптації до зміни клімату. У західних країнах, таких як Великобританія, США та Німеччина, включення цілей адаптації до зміни клімату у просторове планування стало основною політикою [10].

Ландшафтна архітектура може відігравати важливу роль у пом'якшенні або зменшенні ризиків, кліматичних катастроф, з якими стикаються великі міста, шляхом прийняття відповідних стратегій проектування. Як компонент міської екосистеми, ландшафтна архітектура може відігравати важливу роль в адаптації до зміни клімату та пом'якшенні її наслідків, а також у сприянні будівництву

низьковуглецевих та стійких міст. Це також сприяє покращенню міського середовища проживання та підвищенню рівня сталого розвитку міст. Оскільки міста стикаються з частішими та серйознішими кліматичними катастрофами та ризиками, такими як екстремальні погодні явища, необхідно всебічно враховувати та вирішувати ці питання в міському плануванні та проектуванні [11].

Швидка урбанізація та глобальна зміна клімату є основними викликами, що стоять перед міським розвитком у всьому світі. Міста, як основні місця людської діяльності, є не лише основними джерелами викидів парникових газів, але й одними з найбільш екологічно вразливих районів, які найбільше страждають від зміни клімату.

Наразі понад половина населення світу проживає в містах, і очікується, що ця тенденція продовжиться. Згідно з прогнозами ООН, до 2050 року майже 70% населення світу проживатиме в містах. Швидка та інтенсивна урбанізація серйозно послаблює нормальні функції міських систем, чинячи величезний тиск на інфраструктуру, порушуючи екологічний баланс, збільшуючи екологічне навантаження на міста та посилюючи їх вразливість, ускладнюючи подолання негативних наслідків зміни клімату.

Таким чином, сучасні міста відіграють особливу роль в адаптації до змін клімату. Зважаючи на високу щільність населення, зростання споживання ресурсів і розвинену інфраструктуру, вони з одного боку є причиною глобального потепління, з іншого – вони самі особливо вразливі до нього.

1.2. Вплив кліматичних змін на екологічний стан міста Лодзь

Лодзь, розташований у центральній частині Республіки Польща, виступає найбільшим урбаністичним центром Лодзинського воєводства та посідає четверте місце у країні за чисельністю населення. За даними 2025 року чисельність населення міста Лодзь – становить 770 – 772 тис. Лодзь займає 3 місце за чисельністю населення у Польщі з 59 міст [12].

Географічне положення міста зумовлює його значущість як транспортно-логістичного, промислового та соціально-економічного вузла, що посилює актуальність досліджень щодо сталого розвитку урбанізованих територій.

В останні десятиліття на місто Лодзь зазнає значного впливу глобальної зміни клімату. Одним із найбільш помітних проявів є стійке зростання середньорічних температур, яке фіксується у регіональних багаторічних кліматичних звітів спостережень. Підвищення температури посилює ризик виникнення кліматично-індукованих екстремальних явищ, серед яких найбільш характерними для міста стають теплові хвилі, інтенсивні опади зливового характеру, різкі міждобові коливання температури та збільшення тривалості періодів атмосферної посухи. Дані явища безпосередньо впливають на якість життя населення, стан громадського здоров'я, функціонування міської інфраструктури та формування локального мікроклімату [13].

Кліматичні зміни також мають виражений екологічний ефект. Спостережуване збільшення температури призводить до продовження вегетаційного періоду, що здатне викликати суттєві трансформації у структурі та функціонуванні міських екосистем. Збільшення тривалості вегетації впливає на фенологічні цикли флори, змінює динаміку розвитку інтродукованих та аборигенних видів рослин, а також може сприяти поширенню тепловитривалих та інвазивних видів. Ці процеси потенційно трансформують біорізноманіття міста та потребують комплексного моніторингу.

Зміна клімату надає комплексний вплив на функціонування міської інфраструктури, виявляючись у трансформації різних сфер життєдіяльності міста. В умовах почастішання екстремальних метеорологічних явищ, таких як теплові хвилі, зливи, періоди посухи та різкі температурні коливання, зростає вразливість транспортних систем, об'єктів комунального господарства, енергетичної мережі, систем водовідведення та соціально-економічної інфраструктури. Ці процеси призводять до збільшення експлуатаційних витрат, зростання навантаження на інженерні комунікації та зниження рівня стійкості міського середовища [14].

Флора Лодзі, у складі якої представлено близько 75% видів судинних рослин, характерних для центральної Польщі, формується переважно під впливом антропогенних факторів та меншою мірою визначається різноманітністю природних місцепроживань. Сучасна структура урбанофлори Лодзі є типовою для великих міст Центральної Європи та багато в чому порівнянна з флорами Варшави та Познані, що підтверджує наявність загальних тенденцій формування рослинного покриву в умовах інтенсивно трансформованих урбанізованих територій.

Інтенсивна урбанізація, що супроводжується активним освоєнням території, ущільненням забудови та зниженням площі природних біотопів, призвела до суттєвого порушення природного біорізноманіття міських біоценозів. Просторова диференціація флористичного розмаїття проявляється у вираженому градієнті, що з рівнем антропогенної навантаження: з наближенням до центральної частини міста спостерігається зниження видового багатства рослин. В окремих центральних районах його показники становлять близько 100 видів на км², що відображає високий ступінь трансформації природних угруповань.

Найбільша флористична різноманітність реєструється в зоні переходу між власне міською та приміською територіями, де умови для існування рослинних угруповань найбільш сприятливі внаслідок мозаїчності ландшафту, наявності фрагментів зелених насаджень, ділянок напівприродної рослинності та зниження урбанізаційного пресингу. Тут кількість видів перевищує 330 видів на км², що відповідає максимуму для Лодзі. У периферійних приміських районах видове розмаїття знову зменшується, досягаючи значень близько 295 видів на км², що може бути пов'язане з переважанням сільськогосподарських угідь і менш різноманітної структури доступних біотопів [15].

Таким чином, флора Лодзі відображає закономірності урбаністичного середовища та демонструє виражену залежність від ступеня антропогенного тиску та просторової організації міського середовища. Дані тенденції наголошують на необхідності розробки адаптивних заходів управління зеленою

інфраструктурою, спрямованих на збереження та відновлення біорізноманіття в умовах урбанізації.

Прогресуючі процеси урбанізації, призводять до суттєвих змін флористичного складу міста, у тому числі до збільшення частки антропофітів - видів, поява та поширення яких обумовлено діяльністю людини. Їхня представленість зростає в міру посилення урбанізаційної дії: якщо на периферійних територіях Лодзі частка антропофітів становить менше 3%, то в центральних районах перевищує 45%. Ця закономірність відображає зростання флористичної синантропізації та зниження стійкості природних фітоценозів до антропогенного пресингу [16].

Особливу увагу привертає збільшення кількості неофітів - адвентивних видів рослин, інтродукованих на територію після 1500 н.е. Неофіти мають високу екологічну пластичність, стресостійкість і часто виявляють інвазійний потенціал, що сприяє їх активному поширенню в урбанізованих біотопах. У міру зростання антропогенного навантаження та фрагментації природних місць проживання їх частка у міській флорі зростає, витісняючи аборигенні види та змінюючи структуру рослинних угруповань.

Серед деревних насаджень, що перебувають у незадовільному санітарному стані, переважають види, що характеризуються підвищеною вразливістю до міських стресорів (забруднення повітря, засолення ґрунтів, нестача вологи, пошкодження кореневих систем). Найбільш поширеними серед ослаблених та деградуючих екземплярів є: клен повислий (*Acer pseudoplatanus*), липа кримська (*Tilia euchlora*), клен ясенелистий (*Acer negundo*), ясен віргінський (*Fraxinus americana*) та робінія лжеакація.

Процеси урбанізації супроводжуються не тільки зміною флористичного складу, а й трансформацією екологічних вимог рослин до умов проживання. У центральній частині Лодзі, в порівнянні з приміськими територіями, зростає частка термофільних (теплолюбних) видів, а також видів, адаптованих до специфічних урбанізованих біотопів, що характеризуються підвищеною інсоляцією, зниженою вологістю, збільшеною лужністю субстрату та високим

ступенем антропогенної трансформації ґрунтів. Ці умови відповідають типовим параметрам урбаністичних екотопів, де формування рослинних угруповань визначається мікрокліматом міського теплового острова, фрагментацією зелених насаджень та зміненими фізико-хімічними властивостями субстрату [17].

За даними сучасних флористичних досліджень, на території Лодзі виявлено понад 430 видів антропофітів, тобто видів чужорідного походження, інтродукованих людиною та адаптованих до нових умов існування. Значна частина цих видів відноситься до категорії адвентивної флори, яка формується за рахунок випадкового або цілеспрямованого занесення рослин. Серед антропофітів фіксуються і рідкісні для Польщі види, такі як конюшина вузьколиста (*Trifolium angustifolium*), гірчиця звичайна (*Sinapis arvensis*) і дурнишник колючий (*Xanthium spinosum*), що підкреслює роль міста як транзитної території для поширення флор [18].

Більшість зазначених видів представлені транзитними (ефемерними) антропофітами, які не закріпилися у стійких фітоценозах та виявляють тимчасовий характер присутності. Їх поширення найчастіше пов'язане з транспортною діяльністю, міграцією насіння по шляхах сполучення та господарською активністю населення. Деякі з цих видів були тісно пов'язані з промисловою специфікою Лодзі - передусім з текстильним виробництвом: їх поява була зумовлена імпортом сировини, транспортуванням волокнистих матеріалів і діяльністю обробних підприємств. Проте трансформація економічної структури міста наприкінці ХХ – на початку ХХІ століття призвела до скорочення промислової активності, що сприяло регресу та локальному зникненню низки таких видів внаслідок втрати відповідних ніш та шляхів занесення.

Інтенсивна урбанізація, високий ступінь антропогенної трансформації територій та міський тепловий острів, що сформувався, сприяють закріпленню та активному поширенню інвазійних видів рослин у флорі Лодзі. Інвазійні види - це чужорідні рослини, які не тільки успішно натуралізувалися, але і негативно впливають на місцеві екосистеми, витісняючи аборигенну флору, змінюючи

структуру фітоценозів і порушуючи функціонування природних і напівприродних біотопів [19].

До найбільш поширених і екологічно значимих інвазійних неофітів у межах міста Лодзі відносяться:

Клен ясенелистний (*Acer negundo*) - відрізняється високою регенеративною здатністю, швидко заселяє порушені території, формуючи монодомінантні спільноти та пригнічуючи розвиток місцевих деревних та чагарникових видів.

Робінія лжеакація (*Robinia pseudoacacia*) — характеризується інтенсивним вегетативним поновленням та алелепатичним впливом на ґрунтову біоту, що призводить до зниження біорізноманіття трав'янистих угруповань.

Золотарник канадський (*Solidago canadensis*) та золотарник гігантський (*Solidago gigantea*) — утворюють густі куртини, ефективно конкурують із місцевими видами за ресурси, сприяють деградації лугових та опушкових угруповань.

Сумах оцтовий (*Rhus typhina*) – активно поширюється у міських зелених насадженнях завдяки високій вегетативної активності, змінюючи структуру просторової організації рослинного покриву.

Розширення ареалів даних видів у міському середовищі обумовлено їх екологічною пластичністю, толерантністю до стресових факторів (засолення ґрунтів, забруднення повітря, механічне порушення субстрату) та відсутністю природних механізмів біотичного контролю. Їх прогресуюче поширення є суттєвою загрозою для збереження локального біорізноманіття та стійкості міських екосистем [19].

Зелена інфраструктура, що охоплює мережу взаємопов'язаних природних та напівприродних міських територій, є одним із ключових інструментів підвищення екологічної стійкості міського середовища. Однією з її значних функцій виступає стримування поширення інвазійних видів рослин та мінімізація їх негативного впливу на місцеві екосистеми.

РОЗДІЛ 2

МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕЛеноЇ ІНФРАСТРУКТУРИ М. ЛОДЗЬ

Наші дослідження зеленої інфраструктури м. Лодзь в контексті адаптації до кліматичних змін були проведені влітку 2024 року у три етапи. Перший етап – це характеристика стану рослинного покриву міста за допомогою визначення індексу NDVI. Другий етап – це оцінка пилєвловлючої здатності листової поверхні різних видів деревної рослинності у м. Лодзь та 3 етап – це SWOT-аналіз зеленої інфраструктури м. Лодзь.

Індекси рослинності вимірюють кількість зеленої рослинності на певній території та можуть використовуватися для оцінки її стану. Найбільш поширеним індексом рослинності є нормалізований різницевий індекс рослинності (NDVI). Його ще називають вегетаційний індекс, який розраховується як різниця між показниками відображення в ближньому інфрачервоному (БІК) та червоному діапазонах, поділена на їхню суму. Цей індекс розраховується на основі супутникових даних і є найбільш використовуваним індексом для вирішення завдань, що потрібні для кількісної оцінки рослинного покриву.

Обчислюється за такою формулою [20].

$$NDVI = NIR - RED / NIR + RED \quad (2.1)$$

де, NIR - відображення у ближній інфрачервоній області спектру

RED - відображення у червоній області спектру

Відповідно до цієї формули, щільність рослинності (NDVI) у певній точці зображення дорівнює різниці інтенсивностей відбитого світла в червоному та інфрачервоному діапазоні, поділений на суму їх інтенсивностей.

Розрахунок NDVI базується на двох найбільш стабільних (не залежних від інших факторів) ділянках спектральної кривої відбиття судинних рослин. У

червоній області спектра (0,6-0,7 мкм) лежить максимум поглинання сонячної радіації хлорофілом вищих судинних рослин, а в інфрачервоній області (0,7-1,0 мкм) знаходиться область максимального відбиття клітинних структур листка. Тобто висока фотосинтетична активність (пов'язана, як правило, з густою рослинністю) веде до меншого відображення у червоній області спектру та більшого в інфрачервоній. Ставлення цих показників один до одного дозволяє чітко відокремлювати та аналізувати саме рослинність, а не інші природні об'єкти. Використання не простого відношення, а нормалізованої різниці між мінімумом і максимумом відбитків збільшує точність вимірювання та дозволяє зменшити вплив таких явищ як відмінності у освітленості знімку, хмарності, поглинання радіації атмосферою тощо.

Простими словами, NDVI показує «зеленість» території, тобто активність фотосинтезу та щільність рослинного покриву. Чим вище NDVI, тим гущіша та здоровіша рослинність

Значення NDVI варіюються від -1 до 1. Низькі значення NDVI зазвичай відповідають безплідним ділянкам зі скелями, піском, відкритими ґрунтами або снігом, тоді як вищі значення NDVI вказують на більш зелену рослинність, включаючи ліси, орні землі та водно-болотні угіддя. Зображення із супутників НАСА, що спостерігають за Землею, фіксують значення NDVI у всьому світі.

Інтерпретація результатів представлена в таблиці.

Таблиця 2.1

Інтерпретація значень індексу NDVI

Тип об'єкту	Відображення у червоній області	Відображення у інфрачервоній області	Значення NDVI
Густа рослинність	0,1	0,5	0,7
Розряджена рослинність	0,1	0,3	0,5
Відкритий ґрунт	0,25	0,3	0,025
Хмари	0,25	0,25	0
Вода	0,02	0,01	-0,25
Штучні матеріали (бетон, асфальт)	0,3	0,1	-0,5

Другим етапом досліджено було визначено пильовловлюючі здібності листків різних порід дерев. Листя збирались випадково з нижньої половини крони (з висоти 1,5-2 м) з усіх боків. Було відібрано по 10 листочків з кожного виду дерева в кожній локації в 20 серпня, в суху погоду, перед часом збору дощу не було 12 діб. Зрізали листя в перчатках, поміщали у паперовий пакет, робили надпис на кожному пакеті, в якому вказували вид дерева, локацію, дату та час.

Наступний етап - це промивання листків. В стакан зі 100 мл дистильованої води розміщували наші листочки, струшували склянку 5 хвилин, щоб весь пил змився з листя. Після цього воду зливали через марлю, щоб вловити тверді частинки (пил), тобто частинки пилу залишаються на марлі. Наступний етап - це висушування та зважування. Сушили ми в духовці 1 годину, потім зважували на електронних ювелірних вагах TN-20 (0.001 g/20g) з точністю 0,001 г (1 мг).

Зважували масу чистого сухого фільтру та фільтру з пилом. Розрахунок проводили за формулою [21].

$$M_{\text{пилу}} = M_{\text{фільтр+пил}} - M_{\text{фільтр}} \quad (2.2)$$

де $M_{\text{фільтр+пил}}$ – маса фільтру з пилом

$M_{\text{фільтр}}$ – маса пустого фільтру

Щоб привести до одного листа ділили масу пилу на N (кількість листків)

$$M_{\text{пилу на лист}} = M_{\text{пилу}} / N \quad (2.3)$$

Для комплексної оцінки стану та перспектив розвитку зеленої інфраструктури міста Лодзь в контексті зміни клімату необхідно застосувати інструменти стратегічного аналізу, які дозволяють виявити ключові фактори, які впливають на ефективність природоорієнтованих рішень.

Одним із таких інструментів є SWOT-аналіз, який дає можливість визначити сильні сторони (Strengths), слабкі сторони (Weaknesses), можливості (Opportunities) та загрози (Threats) у контексті адаптації Лодзі до кліматичних змін.

Для проведення SWOT-аналізу зеленої інфраструктури м. Лодзь було використано наступні офіційні документи.

1. Plan zazieleniania Łodzi do 2030 roku z perspektywą do 2050 r. План озеленення Лодзі до 2030 з перспективою до 2050. Це основний стратегічний документ із зеленої інфраструктури міста. Він містить цілі, слабкі місця, пріоритети озеленення, кліматичні ризики, зони втручання.

2. Strategia Rozwoju Miasta Łodzi 2030+. Стратегія розвитку міста Лодзь 2030+) Визначає загальні напрями просторового розвитку, серед яких - зелена інфраструктура, адаптація до зміни клімату, якість повітряного середовища.

3. Miejski Plan Adaptacji do zmian klimatu dla Łodzi (MPA) - 2019. Муніципальний план адаптації зміни клімату. Важливий документ, який описує кліматичні загрози для Лодзі, такі як перегрів, посухи, забруднення повітря, сильні опади та роль зеленої інфраструктури в адаптації до тих загроз.

4. Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Miasta Łodzi (SUiKZP). Студія умов та напрямків просторового розвитку Лодзі. Визначає функціональне зонування міста та території, які призначені для зелених насаджень.

5. Program ochrony środowiska dla Miasta Łodzi 2020–2023 z perspektywą do 2027. Програма охорони довкілля Лодзі. Вона містить дані про якість повітря, ґрунту, водних ресурсів, це можна використовувати для виявлення слабких сторін зеленої інфраструктури.

6. Raport o stanie Miasta Łodzi. Це щорічна статистика населення, бюджету, інвестицій, дані щодо екологічних показників. Цей документ необхідний для заповнення розділів «Можливості» та «Загрози» в SWOT.

7. Inwentaryzacja zieleni miejskiej (GEO-Zieleń). Офіційна GIS-інвентаризація дерев, включаючи стан, вік, розміщення. Це необхідно для аналізу сильних та слабких сторін. Доступ через міську геоплатформу: <https://geoportal.lodz.pl/>

8. Strategia Łódź 2030 - Polityka przestrzenna. Документ щодо просторового планування, він зазначає де можливі зелені коридори, які зони потребують ревіталізації, тощо.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗЕЛЕНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ М. ЛОДЗЬ

Першим етапом дослідження зеленої інфраструктури м. Лодзь були розрахунки індексу NDVI. Це простий, але ефективний індекс для кількісної оцінки зеленої рослинності.

Вимір індексу NDVI є важливою частиною дослідження, оскільки він надає кількісну характеристику стану рослинного покриву міста. Показники NDVI дозволяють визначити густину, життєздатність та ступінь стійкості зелених насаджень, які мають ключову роль в адаптації Лодзі до кліматичних змін. Цей індекс фіксує як впливають певні кліматичні стреси, такі як посухи, перегрів, теплові хвилі на зелену інфраструктуру та допомагає виявляти території зі зниженою вегетаційною активністю. Такі території вимагають посилення озеленення чи реконструкції. NDVI є об'єктивним інструментом для порівняння різних районів міста, оцінки ефективності існуючих зелених коридорів та визначення зон кліматичної вразливості. Таким чином його використання допоможе розробити рекомендації щодо підвищення стійкості міського середовища в умовах зміни клімату.

Ми отримали наступні результати:

system:index	NDVI_max	NDVI_mean	NDVI_median	NDVI_min	NDVI_stdDev	.geo
0	0.7222699914	0.3739896149	0.4043093415	-0.1362323728	0.1472567441	{"type":"Polygon","cc

Рис. 3.1 Скопійовані результати розрахунку індексу NDVI з платформи Earth Engine від Google

Підсумкові значення для міста Лодзь (червень-серпень 2024 року) представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Підсумкові значення NDVI для міста Лодзь (червень-серпень 2024 року)

Показник	Значення
NDVI max	0,7223
NDVI mean (середнє)	0,37399
NDVI mediane (медіана)	0,40431
NDVI min	-0,13623
NDVI stdDev (стандартне відхилення)	0,14726

NDVI mean (середнє) - 0,37399, це означає, що в середньому місто має помірний рівень озеленення. Для великого європейського міста це нормальний показник.

Медіана має значення вище за середнє, NDVI mediane (медіана) - 0,40431. Це говорить про те, що у Лодзі є багато ділянок із досить високими значеннями NDVI (парки, лісопарки), але середнє «просідає» через густо забудовані райони.

Максимальне значення індексу NDVI max складає 0,7, що Лодзь має здорові щільні насадження, що характерно для великих парків, лісових зон та околиць міста, які з'єднані з великими лісовими масивами.

Мінімальні значення NDVI min - -0,136. Негативні значення, це вода, будови, дороги, промислові площі, це абсолютно нормально для сучасного міста.

Невелике стандартне відхилення NDVI stdDev – 0,147 означає, що зелена інфраструктура розподілена нерівномірно, але без крайніх контрастів (наприклад, немає дуже великих площ з надзвичайно високими або дуже низькими значеннями). Це є типовим для центральноєвропейських міст.

На основі цих даних була побудована гістограма

На рисунку показано розподіл значень NDVI на території міста Лодзь. Кожна колонка показує, скільки пікселів на супутниковому зображенні мають певне значення NDVI. По горизонталі (X-вісь) – значення NDVI від -0.1 до 0.7, по вертикалі (Y-вісь) – скільки разів таке значення зустрічається в межах міста.

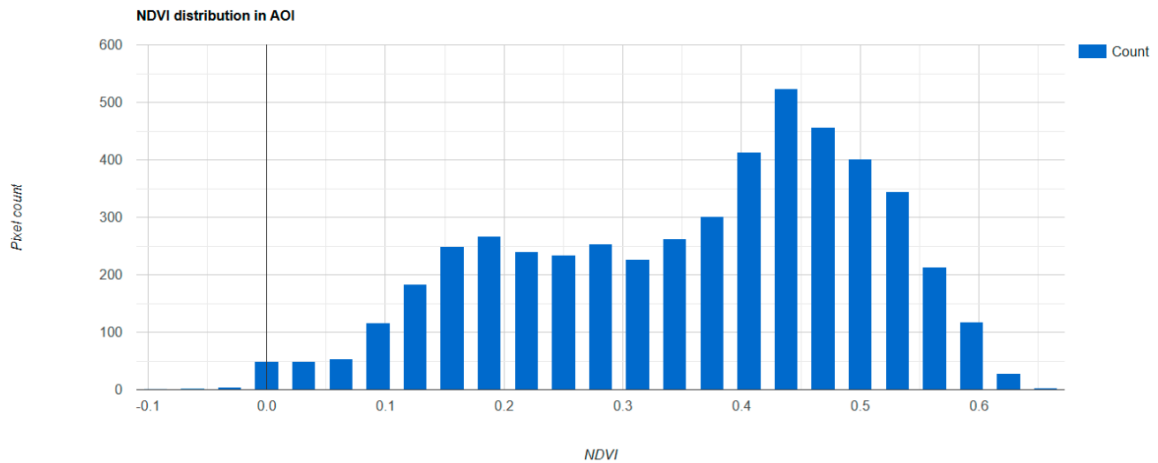


Рис. 3.2 Розподіл значень NDVI для території міста Лодзь

Переважає більшість пікселів перебуває у діапазоні NDVI 0,3 - 0,55. Це видно по найвищих шпальтах - там 300 - 500 пікселів. Це означає, що значна частина території Лодзя має середню чи гарну рослинність (парки, дерева, газони, лісопаркова зона).

Пік розподілу приблизно в районі NDVI 0,45 – 0,5. Тобто найпоширеніша "зеленість" міста відповідає добре розвиненій трав'янистій рослинності, міським паркам, регулярним насадженням, деревно-чагарниковим територіям. Це відповідає реальній структурі Лодзя, де багато парків та зелених коридорів.

Мало значень нижче 0,1. Стовпці у - 0,1...0,0 майже нульові. Це означає, що міська територія Лодзя не перевантажена "сірою" інфраструктурою (асфальт, бетон, промислові зони), як у деяких промислових містах.

Майже ні NDVI > 0,65. Значення вище 0,65 – це густі ліси, великі природні екосистеми. Їх у Лодзі небагато, що логічно для великого європейського міста.

Візуалізація зелених зон міста Лодзь при розрахунку індексу NDVI, отримана за допомогою платформи Earth Engine від Google показана на рисунку 3.3.

Таким чином, просторовий розподіл NDVI вказує на наявність функціонуючих зелених коридорів, що є ключовими для кліматичної адаптації.

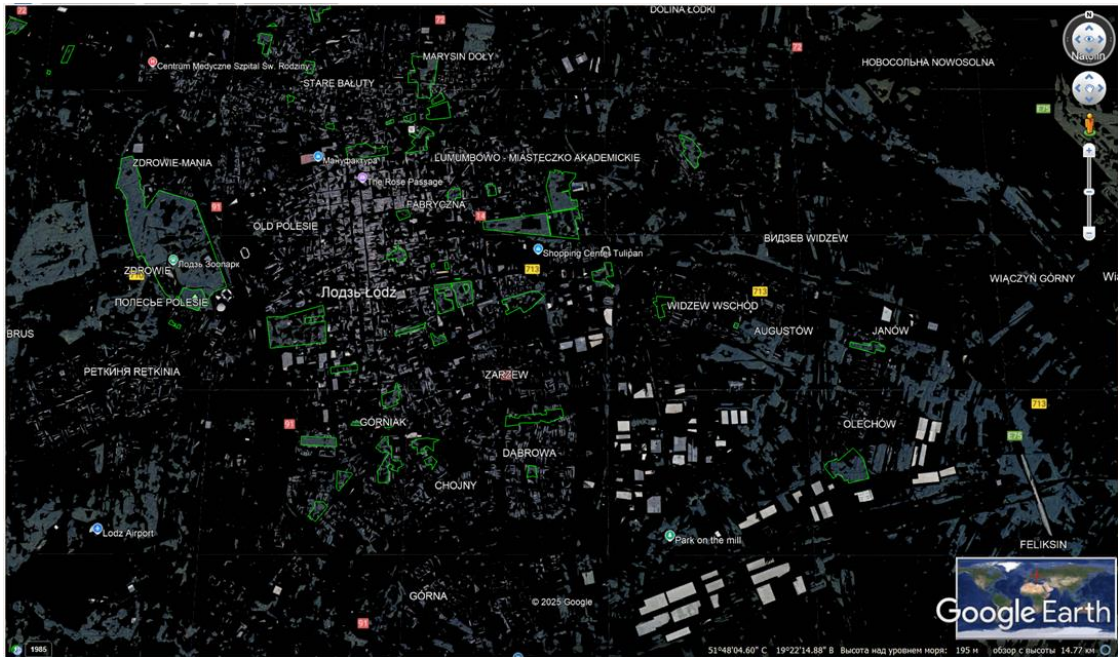


Рис. 3.3 Візуалізація зелених зон міста Лодзь при розрахунку індексу NDVI, отримана за допомогою платформи Earth Engine від Googl

Загалом результати NDVI-аналізу підтверджують, що Лодзь має збалансовану структуру зеленої інфраструктури та достатній потенціал екологічної стійкості.

Наступним етапом нашого дослідження була оцінка пилівловлюючої здатності листової поверхні різних видів деревної рослинності у м. Лодзь.

Відомо, що кліматичні зміни посилюють запиленість повітря міського середовища. Через те можна прогнозувати, що збільшення кількості спекотних днів будуть призводити до більшого фотохімічного змогу, збільшення періодів посухи буде формувати більше сухого пилу, збільшення більше вітряних епізодів до його перенесення, ущільнення ґрунтів та деградацію газонів при спекотному кліматі призведе до більшого вивільнення пилу з ґрунту. Тому, чим більше пилу, тим важливіша роль зелених насаджень які слугують біофільтрами. Дослідження дозволяє зрозуміти, які види рослин справляються краще та мають використовуватися в зеленій інфраструктурі.

Дерева є ключовим рішенням NbS (Nature-based Solutions) в адаптації до кліматичних змін. У стратегіях кліматичної адаптації (EU Green Deal,) дерева виконують три основні функції. Це охолодження повітря, яка пов'язана з тінізацією та транспірацією, зниження теплового острова та фільтрація атмосферних забруднень (PM₁₀, PM_{2.5}, металів).

Пил на листях - це біоіндикатор. Дослідження показують, що світлолюбні, щільнолисті, шорсткі види утримують більше пилу, також види з великою листовою поверхнею також є більш ефективними як "пиловловлювачі". Ці ж самі характеристики пов'язані із посухостійкістю та теплолерантністю. Тобто та сама оцінка дозволяє вибрати види, які добре будуть переносити майбутні посушливі умови Лодзі, і одночасно очищати повітря.

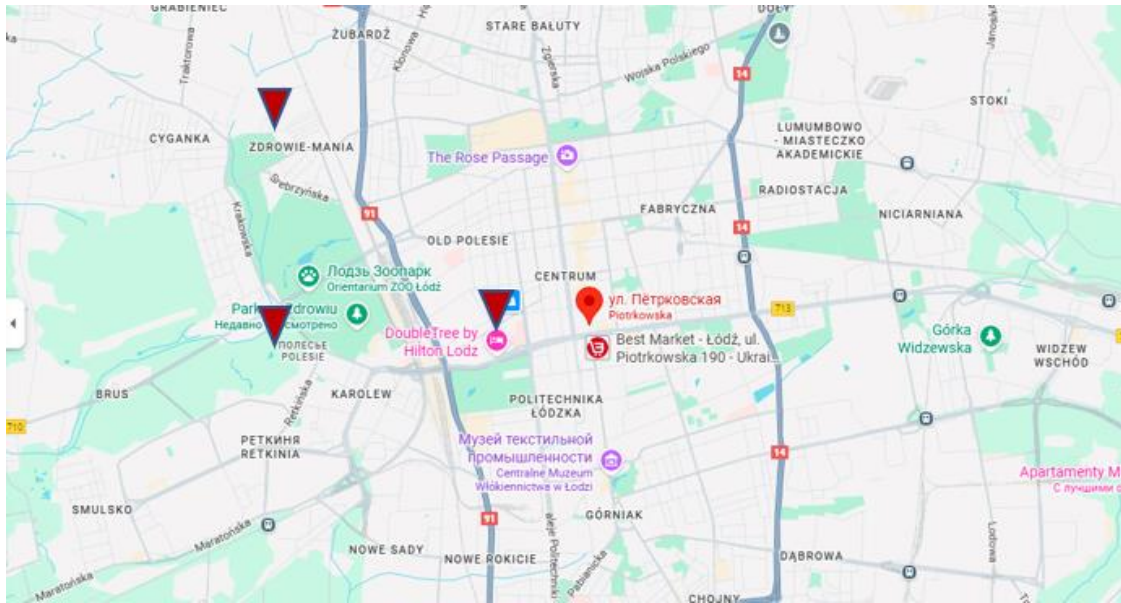
Також такі дослідження допомагають створювати зелені коридори та фільтруючі смуги. Якщо певний вид показує високу пиловловлюючу здатність, то їх доцільно висаджувати вздовж магістралей, ними варто формувати захисні зелені коридори, можна застосовувати для зеленої інфраструктури фільтрації. Усі ці заходи входять до адаптаційних планів міст Європейського Союзу.

Нашими цілями було визначення кількості пилу, що відкладається на листках міських дерев, та демонстрація відмінностей у здатності відкладати пил за видами та місцями розташування. Ми розрахували приблизну кількість пилу, яку можуть відкладати міські дерева, на основі кількості та розміру чотирьох найпоширеніших видів міських дерев.

Для цього ми видібрали 4 найбільш розповсюджені види дерев у місті Лодзь. Це:

- *Acer platanoides* (клен гостролистий)
- *Tilia cordata* (липа дрібнолиста)
- *Fraxinus excelsior* (ясен звичайний)
- *Aesculus hippocastanum* (каштан кінський)

Зразки листочків по 10 шт з кожного виду дерева збирали в один і той же день в різних локаціях. Місця збори листочків представлені на рисунку 3.4.



▼ - Місця відбору листя з дерев різних видів

Рис. 3.4 Місця розташування моніторингових площадок

Перша територія, де збиралися листя – це вулиця Piotrkowska (Петрківська) - головна і вулиця Лодзі, а також найдовша польська пішохідна вулиця, вона має довжину 4,2 км і проходить від майдану Свободи до майдану Незалежності. Її забудова кінця XIX - початку XX століть у стилях модерн та історизм є однією з головних пам'яток міста.

Основна рослинність тут представлена у вигляді дерев, які розташовані уздовж пішохідної частини. Також багато рослинності є у внутрішніх двориках будівель, розташованих на цій вулиці. Загалом вулиця Piotrkowska відома своєю архітектурою, магазинами та ресторанами, а не як місце з великими зеленими насадженнями.

Друга територія – це парк ім. Józefa Piłsudskiego, який мешканці Лодзі частіше називають Na Zdrowiu, є одним з найбільших парків міста. Він займає велику територію приблизно 188 га. з лісовими ділянками, алеями, водоймами та відкритими ландшафтами, завдяки чому парк відіграє серйозну роль у покращенні міського середовища та допомагає Лодзі ефективно адаптуватися до сучасних кліматичних змін.

Головна кліматична функція парку – це охолодження навколишніх районів за рахунок високого вегетаційного потенціалу. У місті він є головним охолоджуючим ядром. Велика кількість дерев створює тінь та знижує температуру повітря влітку. Це особливо важливо зараз, коли у Лодзі все частіше фіксуються періоди сильної спеки. У парку велика площа водних об'єктів, які теж допомагають знижувати температуру за рахунок випаровування, створюючи комфортніший мікроклімат.

Рослинність у парку перебуває у хорошому стані, що підтверджують значення NDVI, які показують щільну та здорову зелень. Такі зрілі дерева, як липи, клени та дуби, не тільки дають багато тіні, але й ефективно поглинають вуглекислий газ, також добре очищають повітря. Їхнє листя затримує пил та інші забруднюючі частинки, що допомагає зменшувати рівень забруднення вздовж великих доріг, що знаходяться неподалік.

Крім того, парк є важливою частиною зеленого коридору, який тягнеться вздовж річки Łódka та поєднує різні природні ділянки у місті. Завдяки цьому через парк проходить рух повітря та поширюються рослини та тварини. Це знижує фрагментацію міської природи та робить екосистему стійкішою.

Наші попередні дослідження, які було викладено у бакалаврській роботі, що були пов'язані з аналізом геометричних показників таких як площа та периметр (як місце дотику з антропогенними територіями) підтвердили велику екологічну стійкість саме парку Na zdrowiu.

Загалом Park Na Zdrowiu – це приклад того, як велика зелена зона може виконувати відразу кілька корисних функцій: покращувати клімат, знижувати температуру влітку, очищувати повітря, підтримувати біорізноманіття та забезпечувати комфортний простір для мешканців. Все це робить парк важливим елементом зеленої інфраструктури і підтверджує його значущість в умовах зміни клімату.

Третє місце відбору зразків листя з різних видів деревної рослинності було обрано територію вздовж великих транспортних шляхів на території міста. Це

національна дорога № 91 класу GP (магістральна дорога прискореного руху), яка проходить через місто.

Дані розрахунків маси пилу та візуалізація результатів представлені в таблиці 3.2 та на рисунку 3.5.

Таблиця 3.2

Результати розрахунку маси пилу на один лист
з листків різних видів дерев

Вид дерева	Місце відбору (Маса/лист), мг		
	Вулиця Piotrkowska	Парк ім. Józefa Piłsudskiego	Національна дорога № 91 класу GP
Acer platanoides (клен гостролистий)	160	60	225
Tilia cordata (липа дрібнолиста)	190	82	270
Fraxinus excelsior (ясен звичайний)	420	100	550
Aesculus hippocastanum (каштан кінський)	850	1500	1900

Аналіз результатів виявився цілком очікуваним. Найчистішою територією виявився парк Na Zdrowiu. Усі види дерев, які ми досліджували накопичили найменшу масу пилу. Наприклад, листки клена містили лише 60 мг, липи - 82 мг, а ясеня - 100 мг пилу на один лист.

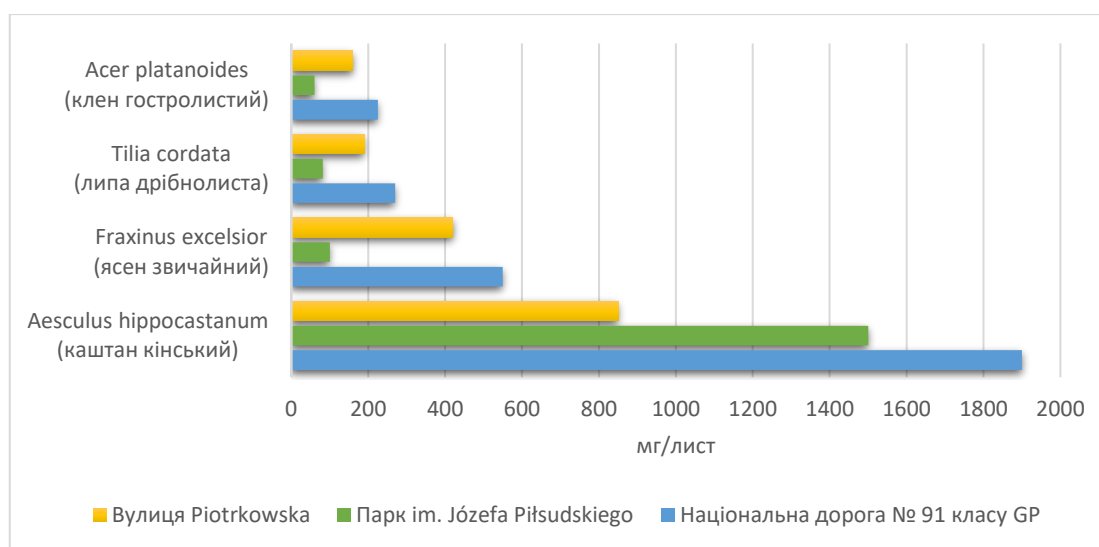


Рис. 3.5 Аналіз накопичення пилу у листках дерев різних видів

Це цілком підтверджує, що паркова зелена зона має значно нижче забруднення, ніж міські дороги, а густі насадження ефективно фільтрують повітря.

Вулиця Piotrkowska має помірний рівень забруднення повітря пилом. Але, не зважаючи на те, що ця вулиця є цілком пішохідною, для всіх видів дерев маса пилу на листках була вищою в 2 - 3 рази, ніж у парку. Клен зібрав 160 мг, липа - 190 мг, а ясен - 420 мг пилу на один лист. Це свідчить про те, що забруднення у центрі міста формується не тільки транспортом, а й іншими чинниками: високою щільністю забудови, інтенсивним відвідуванням, ремонтом будинків, активністю підприємств обслуговування. Крім того, вузька архітектурна структура вулиці створює так званий «міський каньйон», де слабка вентиляція посилює накопичення забруднень. У контексті кліматичних змін такі зони особливо вразливі до перегріву та потребують посиленої зеленої інфраструктури для покращення якості повітря. Це можна досягти штучними видами озеленення, такими як вертикальне озеленення та озеленення дахів.

Найбільш забрудненою цілком очікувано виявилась ділянка біля Національної дороги №91 (клас GP) Тут листки всіх дерев мали максимальні значення. Наприклад: клен - 225 мг, липа - 270 мг, ясен - 550 мг, каштан - 1900 мг (майже 2 г пилу на один лист). Такі показники типові для магістральних доріг із безперервним інтенсивним рухом, де домінують викиди від автомобілів, абразивний пил від шин та гальм.

Також можна зазначити, що каштани найкраще затримують пил, незалежно від місця. Навіть у парку вони утримували 1500 мг пилу – це значно більше, ніж інші види навіть на інших територіях зі значним антропогенним впливом. Це пов'язано з дуже великою площею листка, пальчастою формою, зморшкуватою поверхнею та густою жилковою мережею, які здатні утримувати частинки пилу. Отже, каштан можна вважати одним із найефективніших «фільтрів повітря» в міському середовищі.

Ясен займає друге місце за здатністю накопичувати пил. Тому що складний перистий лист має велику загальну площу і він збирає значні кількості пилу (до

550 мг біля дороги). Це робить ясен важливою породою для насаджень уздовж транспортних коридорів.

Липа утримує більше пилу, ніж клен, завдяки мікрОВОЛОСкам на нижній стороні листка. В умовах центральної частини міста липа показала 190 мг, що на 30 мг більше за клен при тих самих умовах. Це свідчить про те, що морфологічні особливості листка сильно впливають на екологічну ефективність виду.

Клен гостролистий утримує найменше пилу. Причина - гладка поверхня, прості краї листа та менша площа в порівнянні з іншими дослідженими видами. Його показники всюди були найнижчими, що дозволяє робити висновок, що клен менш ефективний у фільтрації повітря, хоча все одно відіграє певну роль у зниженні запиленості.

Наша оцінка та аналіз будови листя різних видів дерев показав, що каштан і липа демонструють максимальну здатність вловлювати пил завдяки великим або опушеним листям. Клен затримує забруднення найгірше через гладку поверхню. Ясен займає проміжне положення: сумарна площа складного листа висока, але його поверхня гладка.

Порівняння локацій показує чітку залежність між інтенсивністю трафіку та накопиченням пилу: Парк < Центр міста < Магістральна дорога. Це підтверджує, що деревна рослинність є надійним біоіндикатором забруднення повітря та важливим елементом адаптації міста до наслідків урбанізації та зміни клімату.

Особливості будови листя та їх пиловловлюючих можливостей ми зібрали у таблиці 3.3.

Отримані дані можна використовувати для рекомендацій щодо формування зеленої інфраструктури Лодзі. Для найзабрудненіших зон доречні посадки каштанів та ясенів. Для центральних кварталів - липи, які добре затримують пил, але не такі вибагливі як каштани. Клени підходять для змішаних насаджень, але не є пріоритетними в ролі «фільтрів».

Таблиця 3.3

Особливості будови листя та їх ефективність до пиловловлювання

Вид дерева	Морфологія листа	Особливості пилезатримання	Ефективність затримання пилу
Acer platanoides (клен гостролистий)	Великий, 5-лопасний, гладка поверхня, довгий черешок	Велика площа листа; складна форма з лопастями, які створюють вихрові потоки та підвищують осадження частинок	Середня - добре затримує великий пил, але гладка поверхня гірше утримує дрібні частинки (PM2.5)
Tilia cordata (липа дрібнолиста)	Серцеподібний лист, матова поверхня, знизу дрібні волоски	Волоски на нижній стороні працюють як «пастки» для пилу; дрібна зубчастість допомагає утримувати частки пилу	Висока - одна з найкращих порід для фільтрації міського повітря
Fraxinus excelsior (ясен звичайний)	Складний лист із 7–13 листочків, тонка пластинка, зубчастий край	Багато дрібних листочків створюють велику сумарну площу; шорсткий край затримує зважені частки	Середня-висока - ефективний проти дрібних і середніх фракцій пилу
Aesculus hippocastanum (каштан кінський)	Дуже великий складний лист з 5-7 великих часток	Величезна площа листа; сильна жилкуватість; шорстка поверхня сприяє налипанню пилу	Дуже висока - один із лідерів із уловлювання пилу та забруднень у містах

Наступним етапом роботи було зроблено SWOT-аналіз. Проаналізував офіційні документи, які перераховані у попередньому розділі ми зробили SWOT-аналіз зеленої інфраструктури м. Лодзь.

S - Strengths (Сильні сторони)

1. Розвинена мережа парків та зелених зон. Лодзь має кілька великих парків (Park na Zdrowiu, Park Źródlińska, Park Źródlińska II), які виконують функцію кліматичних рефугіумів та забезпечують якісну екосистемну послугу з охолодження повітряних мас.

2. Високий відсоток дерев на вулицях. В історичній частині міста збереглися алеї липи, клена, ясеня. Ці види добре адаптовані до міських умов та ефективно затримують пилові частки.

3. Розвинені природні коридори. Система річкових долин (Biała, Łódka) та зелених смуг навколо міських парків формують "зелений каркас" міста.

4. Активна міська програма озеленення. Муніципалітет регулярно висаджує нові дерева та оновлює ушкоджені посадки, приділяючи увагу біорізноманіттю.

5. Низька фрагментація великих зелених масивів. Парки Лодзі мають досить великі площі, що знижує перегрів та забезпечує стійкі місцеперебування для флори та фауни.

W - Weaknesses (Слабкі сторони)

1. Нерівномірний розподіл зелених зон. Центральні частини міста та густозабудовані райони відчувають дефіцит дерев, що посилює локальний перегрів та погіршує якість повітря.

2. Старіння дерев та нестача догляду за ними. На багатьох вулицях дерева старі, мають пошкодження та слабкий приріст. Це знижує їхню здатність адаптуватися до кліматичних стресів.

3. Обмеженість місця нових посадок. Щільна забудова, велика кількість інженерних мереж та вузькі тротуари ускладнюють висадку нових дерев.

4. Низька стійкість деяких видів до екстремальної погоди. Каштан, наприклад, погано переносить посуху, а липи страждають від спеки та сольового навантаження взимку.

5. Розрив зелених з'єднань між районами. Деякі важливі ділянки не з'єднані зеленими коридорами, що знижує циркуляцію повітря та збільшує навантаження на довкілля.

O - Opportunities (Можливості)

1. Використання зеленої інфраструктури як інструменту кліматичної адаптації. Деревина допомагають знижувати температуру повітря, регулюють вологість, зменшують ефект міського теплового острова.

2. Розвиток вертикального та дахового озеленення. Лодзь має безліч промислових будівель та сучасних ЖК, де можливе створення "зелених дахів".

4. Створення нових зелених коридорів та екомереж. Можлива інтеграція занедбаних промислових територій під зелені зони.

5. Використання видів, стійких до кліматичних стресів. У Лодзі можливе використання видів з високою посухостійкістю (дуб черешковий, гледичія, софора).

6. Розширення міських програм для участі мешканців. Ініціативи типу "посади дерево", "зелені двори" можуть підвищити екологічну усвідомленість та прискорити озеленення.

T - Threats (Загрози)

1. Кліматичні зміни (спека, посухи, екстремальна погода). Збільшення температури скорочує тривалість життя дерев та чагарникової рослинності та знижує їх фільтраційні властивості.

2. Зростання концентрації пилу та забруднень. Підвищення трафіку та ремонтні роботи збільшують тиск на зелену інфраструктуру, що знижує її ефективність.

3. Інтенсивна урбанізація. Нова забудова зменшує площі під посадку дерев та призводить до подальшого перегріву ґрунтів та повітря.

4. Хвороби та шкідники, що посилюються через зміну клімату. Наприклад: каштанова мініруюча міль або грибні інфекції, які швидше поширюються при потеплінні.

5. Фрагментація зелених територій у результаті реконструкцій. Часто при ремонті вулиць знищуються старі дерева і нові посадки не компенсують екосистемні втрати.

Таким чином, аналіз показує, що зелена інфраструктура Лодзі має високий потенціал для адаптації міста до кліматичних змін, проте її ефективність обмежується нерівномірним розподілом, старінням посадок та зростанням антропогенного навантаження. При грамотному плануванні місто може значно підвищити свою кліматичну стійкість через розширення зелених зон, оновлення дерев, створення екокоридорів та інноваційних форм озеленення (зелені дахи, вертикальне озеленення).

РОЗДІЛ 4

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ МІСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА ДО КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

На основі проведеної екологічної оцінки ефективності зеленої інфраструктури м. Лодзь та аналізу динаміки NDVI пропонуються такі рекомендації, спрямовані на підвищення стійкості міського середовища до кліматичних змін та покращення стану урбанізованих екосистем.

1. Посилення озеленення територій, де протягом сезону спостерігалися стабільно низькі значення NDVI (<0.25). Для цього рекомендуємо посадки посухостійких видів дерев (*Quercus robur*, *Tilia cordata*, *Acer platanoides*), влаштування квіткових лужків і лугів замість традиційних газонів, формування "зелених коридорів", що з'єднують фрагментовані зелені зони в єдину мережу.

2. Стимулювати розвиток зелених дахів на громадських будівлях та нових житлових комплексах. Заохочувати вертикальне озеленення фасадів у районах із щільною забудовою, де неможливо розширити наземне озеленення. Включити зелені дахи до системи моніторингу для оцінки їхнього вкладу у зниження перегріву.

3. Продовжувати моніторинг NDVI за сезонами за допомогою супутникових даних Sentinel-2. Розробити муніципальну систему раннього попередження про деградацію зелених зон.

4. Посилювати озеленення територій, найбільш схильних до теплових островів (центральні райони Лодзі). Включити зелену інфраструктуру до системи кліматичного менеджменту міста завдяки створенню «охолоджуючих зон», збільшенню тіньових площ, посадці дерев уздовж транспортних коридорів.

5. Проводити програми екологічної освіти щодо ролі зелених насаджень в адаптації до клімату. Підтримувати ініціативи мешканців створення дворових садів, міні-парків, громадських городів. Розробити інтерактивну карту покращень зеленої інфраструктури, доступну для городян.

6. Створення буферних зелених зон біля транспортних магістралей. Щільні ряди дерев разом із кущами можуть зменшити поширення пилу на житлові масиви. Рекомендується висаджувати багаторівневі рослинні композиції (дерева разом з кущами), що значно підвищують ефективність фільтрації повітря.

7. Розвиток парків як кліматичних рефугіумів. Парк ім. Юзефа Пілсудського показав найнижчий рівень запиленості. Необхідно підтримувати та розширювати такі зелені зони, адже вони компенсують перегрів, зменшують частоту забруднення повітря та служать простором для рекреації.

8. Врахування результатів дослідження при проєктуванні нових зелених насаджень. Отримані дані можуть бути використані для створення класифікації територій за рівнем пилового навантаження. Це дозволить оптимально розподілити види рослин залежно від їх екосистемних функцій.

9. Встановлення міського моніторингу пилових частинок за допомогою біоіндикаторів. Регулярні вимірювання пилу на листках дерев дадуть можливість відстежувати рівень забруднення без складного обладнання, швидко реагувати на ділянки з критичними показниками, оцінювати ефективність озеленення через роки.

10. Інтеграція зеленої інфраструктури у стратегію адаптації до кліматичних змін. Озеленення має бути ключовим елементом боротьби з перегрівом, зменшенням концентрації пилу та поліпшенням якості повітря. Рекомендується включити результати цього дослідження до місцевої стратегії «Lodz – miasto odporne na zmiany klimatu».

ВИСНОВКИ

1. За результатами обчислення NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для території м. Лодзь за літній період 2024 року встановлено, що середнє значення NDVI становить 0,374, що вказує на помірний рівень загальної озелененості міста.
2. Рослинний покрив Лодзі характеризується переважанням значень NDVI 0,3 -0,55, що свідчить про високий рівень озеленення.
3. Місто відрізняється мінімальною площею зон з критично низькою рослинністю, що підтверджується малою кількістю пікселів із $NDVI < 0,1$.
4. Значення NDVI вище 0,6 зустрічаються обмежено, що відбиває відсутність великих природних лісових екосистем у центральній частині міста.
5. Просторовий розподіл NDVI вказує на наявність зелених коридорів, що функціонують, ключових для кліматичної адаптації.
6. Загалом результати NDVI-аналізу підтверджують, що Лодзь має збалансовану структуру зеленої інфраструктури та достатній потенціал екологічної стійкості.
7. Каштан кінський є найефективнішим пиловловлювачем (до 900 мг) завдяки великому, шорсткому листю. Ясен звичайний - другий за ефективністю (до 550 мг). Липа дрібнолиста затримує більше пилу завдяки опушенню листка.
8. Найвищі показники пилу зафіксовано біля Національної дороги № 91. Вулиця Piotrkowska також має високий рівень пилу (у 2-3 рази вищий, ніж у парку) через щільну забудову та ефект "міського каньйону«
9. Необхідна заміна чутливих видів на стійкі та інтеграція зелених рішень у будівельні проекти для підвищення стійкості міста.
10. SWOT-аналіз показав, що зелена інфраструктура Лодзі має високий потенціал для адаптації міста до кліматичних змін. При грамотному плануванні місто може значно підвищити свою кліматичну стійкість через розширення зелених зон, оновлення дерев, створення екокоридорів та інноваційних форм озеленення (зелені дахи, вертикальне озеленення).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bigler C., Bräker O.U., Bugmann H., Dobbertin M. and Rigling A., Drought as an inciting mortality factor in scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems*. 2006. Vol. 9 No. 3. P. 330-343.
2. Bakkenes M., Alkemade J.R.M., Ihle F., Leemans R. and Latour J.B., Assessing effects of forecasted climate change on the diversity and distribution of European higher plants for 2050. *Global Change Biology*, 2002. Vol. 8 No. 4. P. 390-407.
3. Wilby R.L. and Perry G.L., Climate change, biodiversity and the urban environment: a critical review based on London, UK. *Progress in Physical Geography*. 2006. Vol. 30 No. 1. P. 73-98.
4. Greiving S., Fleischhauer M. National climate change adaptation strategies of European states from a spatial planning and development perspective. *European Planning Studies*. 2012. 20(1): P. 27-48.
5. European Commission. A Roadmap for Moving to a Competitive Low Carbon Economy in 2050: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. – Publications Office of the European Union, 2011.
6. Kousky C., Schneider S. H. Global climate policy: will cities lead the way? // *Climate policy*. 2003. Vol. 3. №. 4. P. 359-372.
7. Rosenzweig C. et al. Cities lead the way in climate–change action // *Nature*. 2010. Vol. 467. №. 7318. P. 909-911.
8. Broto V. C. Urban governance and the politics of climate change // *World development*. 2017. Vol. 93. P. 1-15.
9. Heidrich O. et al. National climate policies across Europe and their impacts on cities strategies // *Journal of environmental management*, 2016. Vol. 168. P. 36-45.
10. Кузьмін Ю. Economic consequences and developed policies on climate change in European Union countries. УКУ. Львів, 2023. 78 с.

11. Cortinovis C. et al. Scaling up nature-based solutions for climate-change adaptation: Potential and benefits in three European cities. *Urban Forestry & Urban Greening*. 2022. Vol. 67. P. 127450.
12. Krajewska A., Wagner I. Łódź – Towards a resilient city. *Cities*. 2020. Vol. 108. P. 65–79
13. Syska B. Urban greening in the process of climate change adaptation of large cities. *Energies*. 2024. Vol. 17, No. 2. P. 1–19.
14. Kuchcik M., Degórska B. Development of green infrastructure as a trend in climate transformation – challenges for Polish cities. *Ekonomia i Środowisko*. 2023. No. 1(84). P. 8–29.
15. Špirková D., Ondoš S., Finka M. The green infrastructure in cities as a tool for climate change adaptation and mitigation: Slovakian and Polish experiences. *Atmosphere*. 2019. Vol. 10, No. 9. Article 552.
16. Nowak M., Choryński A. Urban adaptation to climate change and resident awareness: A Polish perspective. *Acta Innovations*. 2023. No. 49. P. 34–45.
17. Wolaniuk A. Urban regeneration and urban resilience planning through connectivity: the importance of this principle of new urbanism. *European Spatial Research and Policy*. 2022. Vol. 29, No. 2. P. 119–136.
18. Grzelak-Kostulska E., Hołowiecka B. The role of urban gardening in building city resilience to climate change. *Ekonomia i Środowisko*. 2021. Vol. 79, No. 4. P. 44–60.
19. Wolff M., Wiechmann T. Climate change adaptation activities planning and implementation in large cities: results of research carried out in Poland and selected European cities. *Climatic Change*. 2023. Vol. 177. Article 34.
20. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., & Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite Symposium*, 1973. NASA SP-351, P. 309–317.
21. Wang L.; Gong H.; Liao W.; Wang Z. Accumulation of particles on the surface of leaves during leaf expansion. *Sci. Total Environ*. 2015, 532, P. 420–434.