

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)

« _____ » _____ 2026 р.

Кваліфікаційна робота
здобувача _____ першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
(першого (бакалаврського) / другого (магістерського))

Оцінка фітотоксичного впливу атмосферного пилу урбанізованого середовища
(назва роботи)

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

Освітня програма _____ Екологія
(назва освітньої програми)

Виконавець _____ Віктор КАЛУГІН
(підпис) (ім'я, прізвище)

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

Харків – 2026

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
Рівень вищої освіти (освітньо-кваліфікаційний рівень) бакалавр
Спеціальність 101 Екологія

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

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

“ 20 ” травня 2025 року

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

_____ Віктору КАЛУГІНУ
(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи Оцінка фітотоксичного впливу атмосферного пилу урбанізованого середовища

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

затверджені наказом по університету від “ _____ ” квітня 2026 року

2. Строк подання студентом роботи 01 травня 2026 р.

3. Перелік питань, які потрібно розробити:

1. проаналізувати сучасні літературні джерела щодо проблеми пилового забруднення урбанізованого середовища та його впливу на рослини;
2. охарактеризувати особливості формування атмосферного пилу в різних функціональних зонах міста Харків;
3. відібрати проби атмосферного пилу в зонах з різним рівнем антропогенного навантаження;

4. провести біотестування водних витяжок пилу з використанням *Lepidium sativum* L.;
5. визначити показники схожості насіння, довжини коренів і паростків;
6. розрахувати індекс фітотоксичності та індекс проростання;
7. провести статистичну обробку результатів дослідження;
8. оцінити залежність рівня фітотоксичності від функціонального призначення міських зон

4. План роботи

№ з/п	Назви етапів роботи
1	Стан вивчення питання щодо токсичних властивостей атмосферного пилу
2	Методи дослідження фітотоксичного впливу атмосферного пилу урбанізованого середовища
3	Аналіз та узагальнення результатів щодо фітотоксичного впливу пилу урбанізованого середовища

5. Дата видачі завдання 20.05.2025 р.

Студент

підпис

Віктор КАЛУГІН

ім'я і прізвище

Керівник роботи

підпис

доц. Іветта КРИВИЦЬКА

посада, ім'я і прізвище

АНОТАЦІЯ

**ОЦІНКА ФІТОТОКСИЧНОГО ВПЛИВУ АТМОСФЕРНОГО ПИЛУ
УРБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА**

Віктор КАЛУГІН

Кваліфікаційна робота «Оцінка фітотоксичного впливу атмосферного пилу урбанізованого середовища» містить 39 сторінок, 4 розділи, 5 таблиць, 3 рисунки, та 25 використаних джерел.

Мета роботи: надати оцінку фітотоксичного впливу атмосферного пилу урбанізованого середовища міста Харків за допомогою біотестування на *Lepidium sativum* L.

Актуальність дослідження полягає у необхідності розроблення простих, інформативних та доступних методів оцінки екологічного стану атмосферного повітря урбанізованих територій. Використання біотестування дозволяє оперативно визначати рівень фітотоксичності атмосферного пилу в різних функціональних зонах міста та може бути ефективним інструментом системи локального екологічного моніторингу.

Завдання дослідження. Оцінити фітотоксичний вплив атмосферного пилу в різних функціональних зонах м. Харків та оцінити залежність рівня фітотоксичності від функціонального призначення міських зон.

Методи. Польові, лабораторні та розрахункові методи досліджень.

Результати. Встановлено, що атмосферний пил Харкова має виражену фітотоксичну дію на *Lepidium sativum* L., яка зростає зі збільшенням антропогенного навантаження. Найвищу токсичність виявлено в транспортних зонах, найнижчу - в рекреаційних; найбільш чутливим показником є довжина кореня. Основним джерелом забруднення є транспортні викиди, а метод фітотестування підтверджено як ефективний для оцінки стану міського середовища.

ФІТОТОКСИЧНІСТЬ, АТМОСФЕРНИЙ ПИЛ, УРБАНІЗОВАНЕ СЕРЕДОВИЩЕ, СХОЖІСТЬ

ABSTRACT

**ASSESSMENT OF THE PHYTOTOXIC EFFECT OF ATMOSPHERIC
DUST IN URBAN ENVIRONMENT**

Victor KALUGIN

The qualification thesis titled “*Assessment of the Phytotoxic Effect of Atmospheric Dust in Urban Environment*” consists of 39 pages, 4 chapters, 5 tables, 3 figures, and 25 references.

Aim of the study: to assess the phytotoxic effect of atmospheric dust in the urban environment of the city of Kharkiv using bioassay testing with *Lepidium sativum* L.

Relevance of the study: lies in the need to develop simple, informative, and accessible methods for assessing the ecological condition of atmospheric air in urban areas. Bioassay testing enables rapid determination of the phytotoxicity level of atmospheric dust in different functional zones of a city and can serve as an effective tool in local environmental monitoring systems.

Objectives of the study: to assess the phytotoxic effect of atmospheric dust in different functional zones of Kharkiv and to determine the dependence of phytotoxicity levels on the functional designation of urban areas.

Methods: field, laboratory, and computational methods.

Results: It was established that atmospheric dust in Kharkiv exhibits a pronounced phytotoxic effect on *Lepidium sativum* L., which increases with rising anthropogenic load. The highest toxicity was observed in transport zones, the lowest in recreational areas; the most sensitive indicator was root length. The main source of pollution was identified as vehicular emissions, and the bioassay method was confirmed as an effective tool for assessing the condition of the urban environment.

PHYTOTOXICITY, ATMOSPHERIC DUST, URBAN ENVIRONMENT,
GERMINATION.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 СТАН ВИВЧЕННЯ ПИТАННЯ ЩОДО ТОКСИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АТМОСФЕРНОГО ПИЛУ.....	10
1.1. Атмосферний пил як екологічний фактор урбанізованого середовища.....	10
1.2. Хімічний склад атмосферного пилу та його екологічна небезпека	11
1.3. Вплив атмосферного пилу на рослинний покрив урбанізованих територій.....	13
1.4. Біотестування як метод оцінки токсичності компонентів довкілля	14
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІТОТОКСИЧНОГО ВПЛИВУ АТМОСФЕРНОГО ПИЛУ УРБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА.....	18
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЩОДО ФІТОТОКСИЧНОГО ВПЛИВУ ПИЛУ УБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА	21
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	32
ВИСНОВКИ.....	35
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	37

ВСТУП

В умовах сучасної урбанізації одним із найбільш поширених чинників деградації міського середовища є забруднення атмосферного повітря твердими частинками. Атмосферний пил урбанізованих територій формується під впливом транспортного навантаження, промислових викидів, руйнування дорожнього покриття, будівельних робіт, а також вторинного піднімання частинок з поверхні ґрунту та асфальту. Особливої актуальності ця проблема набуває для великих міст, де високий рівень антропогенного навантаження зумовлює накопичення у пилу важких металів, продуктів згоряння палива, мінеральних та органічних аерозольних частинок [20].

Для міста Харкова проблема пилового забруднення є особливо важливою, оскільки значні транспортні потоки, щільна житлова забудова, локальні пошкодження інфраструктури, наслідки військових дій, а також активні відновлювальні та будівельно-ремонтні роботи сприяють підвищенню концентрації твердих частинок у повітрі. Додатковим джерелом пилу в умовах воєнного впливу є руйнування будівельних конструкцій, пошкодження дорожнього покриття, утворення дрібнодисперсних мінеральних частинок бетону, скла, цегли та інших матеріалів, які легко переходять в аерозольний стан і осідають на поверхні рослин. Осідаючи на листовій поверхні, атмосферний пил може порушувати фізіолого-біохімічні процеси, знижувати інтенсивність фотосинтезу, пригнічувати ріст, зменшувати схожість насіння та негативно впливати на формування міського рослинного покриву [2].

Оцінка фітотоксичності атмосферного пилу є важливим напрямом сучасного урбоекологічного моніторингу, оскільки дозволяє визначати не лише рівень забруднення, а й його біологічні наслідки для рослинних організмів. Одним із найбільш доступних, чутливих і економічно доцільних підходів є метод біотестування з використанням тест-об'єктів, зокрема *Lepidium sativum* L., що широко застосовується для експрес-оцінки токсичності компонентів навколишнього середовища [15].

Актуальність теми полягає у необхідності розроблення простих, інформативних та доступних методів оцінки екологічного стану атмосферного повітря урбанізованих територій, зокрема в умовах зростання пилового навантаження в місті Харків. Використання біотестування дозволяє оперативно визначати рівень фітотоксичності атмосферного пилу в різних функціональних зонах міста та може бути ефективним інструментом системи локального екологічного моніторингу.

Мета: надати оцінку фітотоксичного впливу атмосферного пилу урбанізованого середовища міста Харків за допомогою біотестування на *Lepidium sativum* L.

Об'єкт досліджень: Атмосферний пил урбанізованого середовища міста Харків.

Предмет досліджень: Фітотоксичний вплив водних витяжок атмосферного пилу різних функціональних зон міста Харків на ріст і розвиток *Lepidium sativum* L.

Для досягнення поставленої мети були визначені такі **завдання:**

1. проаналізувати сучасні літературні джерела щодо проблеми пилового забруднення урбанізованого середовища та його впливу на рослини;
2. охарактеризувати особливості формування атмосферного пилу в різних функціональних зонах міста Харків;
3. відібрати проби атмосферного пилу в зонах з різним рівнем антропогенного навантаження;
4. провести біотестування водних витяжок пилу з використанням *Lepidium sativum* L.;
5. визначити показники схожості насіння, довжини коренів і паростків;
6. розрахувати індекс фітотоксичності та індекс проростання;
7. провести статистичну обробку результатів дослідження;
8. оцінити залежність рівня фітотоксичності від функціонального призначення міських зон.

Методи дослідження: У роботі використано аналітичні методи для опрацювання літературних джерел; польові методи для відбору проб атмосферного пилу; лабораторні методи - біотестування на *Lepidium sativum* L.; біометричні методи - вимірювання довжини коренів і паростків та математико-статистичні методи - розрахунок індексів фітотоксичності, проростання та критерію Стюдента.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання методу фітотестування для експрес-оцінки пилового забруднення міських територій; порівняння екологічного стану функціональних зон міста; контролю ефективності озеленення; обґрунтування природоохоронних заходів та оцінки стану територій у процесі відновлення міської інфраструктури.

РОЗДІЛ 1

СТАН ВИВЧЕННЯ ПИТАННЯ ЩОДО ТОКСИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АТМОСФЕРНОГО ПИЛУ

1.1 Атмосферний пил як екологічний фактор урбанізованого середовища

Атмосферний пил є одним із найпоширеніших видів забруднення повітря в межах міста. Він складається з дрібних твердих частинок мінерального, органічного або змішаного походження, які можуть тривалий час перебувати в повітрі, переноситися вітром і осідати на різних поверхнях. У міському середовищі пил є майже постійним компонентом атмосферного повітря, а його кількість значною мірою залежить від інтенсивності антропогенного навантаження [1].

Основними джерелами утворення пилу в містах є автомобільний транспорт, промислові викиди, руйнування дорожнього покриття, будівельні роботи, стирання шин і гальмівних колодок, а також повторне піднімання частинок із поверхні ґрунту та асфальту. За даними сучасних досліджень, саме транспорт є головним джерелом надходження дрібнодисперсних частинок $PM_{2.5}$ та PM_{10} у міське повітря, а разом із ними - сполук свинцю, цинку, міді та інших важких металів [20].

Для великих міст, зокрема Харкова, ця проблема є особливо актуальною через щільну забудову та значне транспортне навантаження. Крім цього, в сучасних умовах додатковим джерелом пилу стали наслідки військових дій, які супроводжуються пошкодженням будівель, руйнуванням бетонних, цегляних і скляних конструкцій, дорожнього полотна та проведенням відновлювальних робіт. Усе це сприяє утворенню великої кількості дрібнодисперсного мінерального пилу, який довго зберігається в атмосфері міста.

Особливу небезпеку становить дрібнодисперсний пил, оскільки він легко затримується на листовій поверхні рослин, частково проникає у породи та порушує фізіологічні процеси. Це може проявлятися у зниженні інтенсивності

фотосинтезу, пригніченні росту, зміні водного режиму та загальному ослабленні рослин. Відомо, що токсичні компоненти пилу, особливо важкі метали, здатні мігрувати у системі «атмосфера - ґрунт - рослина», накопичуватися в тканинах і викликати фітотоксичний ефект [20].

Таким чином, атмосферний пил слід розглядати як важливий екологічний фактор урбанізованого середовища, який відображає рівень антропогенного навантаження на територію. Його вплив на рослини є одним із найбільш чутливих показників екологічного стану міста, що обґрунтовує доцільність використання біотестування для оцінки фітотоксичності пилу.

1.2 Хімічний склад атмосферного пилу та його екологічна небезпека

Хімічний склад атмосферного пилу в міському середовищі є досить різноманітним і залежить від джерел його утворення. До його складу можуть входити мінеральні частинки ґрунту, залишки асфальтового покриття, сажа, продукти згоряння палива, частинки шин, гальмівних колодок, а також сполуки важких металів. Саме склад пилу визначає ступінь його небезпеки для компонентів довкілля, зокрема для рослинного покриву. Дослідження урбанізованих територій України показують, що найбільш забрудненими є зони транспортної інфраструктури, де в пилу та суміжних середовищах накопичуються свинець, мідь, цинк, хром, нікель і кадмій [24].

Одним із найнебезпечніших компонентів атмосферного пилу є важкі метали, оскільки вони не руйнуються в природних умовах, здатні накопичуватися у ґрунті та поступово переходити у рослини. Найчастіше в умовах міста виявляють свинець, цинк, мідь, кадмій та нікель, джерелом яких є транспорт, зношування металевих деталей, мастильні матеріали та промислові викиди. Відомо, що навіть у невеликих концентраціях ці елементи можуть негативно впливати на ферментативні процеси, водний режим і ріст рослин [24].

Окрему небезпеку становлять дрібнодисперсні частинки $PM_{2.5}$ та PM_{10} , які мають дуже малий розмір і тому легко затримуються на листовій поверхні.

Разом із ними на рослини потрапляють токсичні органічні домішки, сажа та сполуки сірки й азоту. Через малий розмір ці частинки мають велику активну поверхню, на якій можуть адсорбуватися додаткові токсиканти, що ще більше підсилює їх фітотоксичний ефект [21].

Для Харкова в сучасних умовах особливого значення набуває також мінеральний пил будівельного походження, який утворюється під час руйнування бетонних, цегляних і скляних конструкцій, пошкодження дорожнього полотна, а також у процесі відновлювальних робіт після наслідків військових дій. Такий пил може містити оксиди металів, силікати, сполуки кальцію, алюмінію та заліза. Хоча частина цих компонентів є відносно інертною, дрібні фракції здатні змінювати реакцію водних витяжок, механічно пошкоджувати тканини рослин і посилювати надходження інших токсикантів у проростки.

Екологічна небезпека атмосферного пилу полягає не лише у його прямому осіданні на рослини, але й у подальшій міграції токсичних компонентів у системі «атмосфера - ґрунт - рослина». Частинки пилу, що осідають на поверхню ґрунту, можуть змінювати його хімічні властивості, накопичувати важкі метали та впливати на процеси проростання насіння. Саме тому фітотоксичний ефект пилу часто проявляється вже на ранніх стадіях розвитку рослин, особливо через пригнічення росту кореневої системи [20].

Таким чином, хімічний склад атмосферного пилу урбанізованого середовища визначає його токсичність і ступінь небезпеки для рослинного покриву. Найбільший ризик створюють дрібнодисперсні частинки, збагачені важкими металами та продуктами згоряння, а в сучасних умовах Харкова - також мінеральний пил, пов'язаний із руйнуванням міської інфраструктури. Саме це обґрунтовує необхідність оцінки фітотоксичності пилу за допомогою біотест-методів.

1.3 Вплив атмосферного пилу на рослинний покрив урбанізованих територій

Рослинний покрив у межах міста одним із перших реагує на погіршення якості атмосферного повітря. Атмосферний пил, який постійно осідає на поверхню листків, пагонів і ґрунту, здатний суттєво змінювати умови росту рослин. Саме тому рослини вважаються чутливими індикаторами стану урбанізованого середовища.

Найпомітніший вплив пилу проявляється через його осідання на листовій поверхні. Частинки покривають листки тонким шаром, зменшуючи проникнення світла до фотосинтетичного апарату. У результаті знижується інтенсивність фотосинтезу, уповільнюється синтез органічних речовин, а рослина витрачає більше ресурсів на підтримання життєвих функцій, ніж на ріст. Крім того, пил може частково закупорювати продихи, що погіршує газообмін і транспірацію. Такі ефекти добре описані для міських дерев і трав'янистих рослин у зонах інтенсивного транспортного навантаження [23].

Окрім механічного впливу, важливу роль відіграє хімічна токсичність пилу. Якщо у його складі є свинець, кадмій, цинк, мідь або продукти згоряння палива, ці речовини можуть переходити у тканини рослин через поверхню листка або після осідання в ґрунт - через кореневу систему. У такому випадку порушуються ферментативні процеси, водний баланс, синтез хлорофілу та поділ клітин, що проявляється у пригніченні росту рослин. Особливо чутливими до цього є молоді проростки [23].

На ранніх етапах розвитку рослин токсичний вплив пилу часто проявляється у зниженні схожості насіння та пригніченні росту кореня. Саме корінь першим контактує з водною витяжкою забруднювачів, тому швидше реагує на токсичні речовини. За даними фітотоксикологічних досліджень, зменшення довжини кореня є одним із найбільш інформативних показників токсичності урбанізованих середовищ. Подібні закономірності були показані для міських ґрунтів і пилових випадінь у промислових та транспортних зонах [17].

Для Харкова ця проблема має ще більшу актуальність через поєднання транспортного пилу з мінеральним пилом від пошкоджених будівель, дорожнього покриття та відновлювальних робіт після наслідків військових дій. Такий пил не лише осідає на листках, але й змінює властивості поверхневого шару ґрунту, що може додатково впливати на процеси проростання насіння та формування кореневої системи. У результаті навіть у рекреаційних зонах міста може спостерігатися фоновий фітотоксичний ефект.

Таким чином, атмосферний пил негативно впливає на рослинний покрив урбанізованих територій як через механічне осідання на листках, так і через надходження токсичних компонентів у рослину. Найбільш чутливими показниками такого впливу є схожість насіння, довжина кореня та довжина паростка, що і визначає доцільність їх використання у біотестуванні.

1.4 Біотестування як метод оцінки токсичності компонентів довкілля

Оцінка стану навколишнього середовища лише за фізико-хімічними показниками не завжди дає повну картину впливу забруднення на живі організми. Саме тому в екологічних дослідженнях все ширше застосовуються біологічні методи, зокрема біотестування. Воно дозволяє визначити не тільки наявність потенційно небезпечних речовин, але й їх реальний вплив на живі системи [9].

Біотестування – це метод оцінки токсичності середовища за реакцією тест-організмів, які мають високу чутливість до змін умов існування. Як тест-об'єкти можуть використовуватися мікроорганізми, водорості, безхребетні або вищі рослини. У випадку рослинних тестів найчастіше аналізують показники проростання насіння, довжину кореня та розвиток проростків [10].

Перевагою біотестування є його відносна простота, швидкість отримання результатів та невисока вартість у порівнянні з інструментальними методами аналізу. Крім того, цей підхід дозволяє оцінити сумарний ефект усіх токсичних речовин у зразку, а не окремих компонентів, що є особливо важливим для складних сумішей, таких як атмосферний пил [11].

У сучасній екології біотестування широко використовується для оцінки стану ґрунтів, води та атмосферних випадінь. Особливо актуальним воно є для урбанізованих територій, де забруднення має комплексний характер і включає одночасну дію різних груп поліутантів – важких металів, органічних сполук та дрібнодисперсних частинок [11].

Однією з ключових переваг біотестів є їх здатність реагувати на низькі концентрації токсикантів, які можуть не перевищувати гранично допустимих норм, але все одно негативно впливати на живі організми. Саме тому біотестування часто розглядається як більш чутливий інструмент порівняно з класичними хімічними аналізами [9].

У фітотестуванні, тобто біотестуванні з використанням рослин, найчастіше аналізують ранні етапи розвитку — проростання насіння та ріст кореня. Ці показники є інформативними, оскільки навіть незначний токсичний вплив швидко відображається на процесах клітинного поділу та розтягування клітин [10].

Таким чином, біотестування є важливим інструментом екологічної діагностики, який дозволяє оцінювати інтегральний вплив забруднювачів на живі організми. Його використання є особливо доцільним у дослідженнях атмосферного пилу, оскільки дозволяє визначити його сумарну фітотоксичність без необхідності детального хімічного аналізу кожного компонента.

У фітотоксикологічних дослідженнях важливим етапом є правильний вибір тест-об'єкта, оскільки саме від його чутливості залежить достовірність отриманих результатів. Одним із найбільш поширених видів, що використовується для оцінки токсичності компонентів довкілля, є *Lepidium sativum* L. (крес-салат) [10].

Крес-салат широко застосовується у біотестуванні завдяки своїм біологічним особливостям. Насіння цієї рослини швидко проростає, а перші результати можна отримати вже через 3 – 5 діб. Це значно спрощує проведення експериментів і дозволяє оперативно оцінити вплив досліджуваних факторів. Крім того, проростки мають відносно однакові розміри, що зменшує варіабельність результатів і підвищує їх точність. [23]

Важливою перевагою *Lepidium sativum* є його висока чутливість до широкого спектра забруднювачів, зокрема важких металів, солей, кислотних сполук і продуктів згоряння. Навіть незначні концентрації токсичних речовин можуть викликати зміни у процесах проростання, що проявляється у зниженні схожості насіння та пригніченні росту кореня і паростка. Завдяки цьому крес-салат вважається одним із найбільш інформативних тест-об'єктів у дослідженнях фітотоксичності.

У більшості досліджень як основні тест-показники використовують схожість насіння, довжину кореня та довжину проростка. Саме ці параметри дозволяють оцінити вплив токсикантів на ранні стадії розвитку рослин. Найбільш чутливим показником вважається довжина кореня, оскільки коренева система першою контактує з розчиненими у середовищі токсичними речовинами [25].

Крім цього, для узагальнення результатів часто застосовують інтегральні показники, такі як індекс проростання (GI), який враховує одночасно схожість насіння та ріст кореня. Це дозволяє більш повно оцінити ступінь токсичності досліджуваних зразків і порівнювати різні варіанти між собою [25].

Ще однією перевагою *Lepidium sativum* є його доступність і невибагливість до умов вирощування. Для проведення експерименту не потрібно складного обладнання або спеціальних умов, що робить цей метод зручним для використання в лабораторних і навчальних дослідженнях.

Таким чином, *Lepidium sativum* L. є ефективним, чутливим і зручним тест-об'єктом для оцінки фітотоксичності компонентів довкілля. Його біологічні особливості дозволяють швидко та достовірно визначати негативний вплив забруднювачів, що обґрунтовує доцільність його використання у дослідженні фітотоксичного впливу атмосферного пилу урбанізованого середовища.

Аналіз літературних джерел показав, що атмосферний пил є одним із ключових факторів забруднення урбанізованого середовища. Його утворення пов'язане з діяльністю транспорту, промисловості, руйнуванням дорожнього покриття, будівельними процесами, а в сучасних умовах – також із наслідками військових дій. При цьому склад пилу є складним і включає мінеральні частинки,

продукти згоряння палива та важкі метали, які можуть чинити негативний вплив на живі організми.

Встановлено, що атмосферний пил здатний впливати на рослини як механічно (через осідання на листовій поверхні), так і хімічно – через надходження токсичних компонентів у тканини рослин. Найбільш чутливими до цього впливу є ранні етапи розвитку, зокрема проростання насіння та формування кореневої системи. Саме тому показники схожості, довжини кореня та паростка широко використовуються для оцінки фітотоксичності.

Огляд наукових праць також показав, що традиційні фізико-хімічні методи не завжди дозволяють оцінити реальний біологічний ефект забруднення. У зв'язку з цим все більшого значення набувають методи біотестування, які дають змогу визначити сумарний вплив комплексу токсичних речовин. Особливо ефективним є використання рослин як тест - об'єктів, зокрема *Lepidium sativum* L., що відзначається високою чутливістю до різних забруднювачів і широко застосовується у фітотоксикологічних дослідженнях.

Разом з тим, аналіз літератури показав, що питання фітотоксичного впливу саме атмосферного пилу, особливо в умовах сучасних урбанізованих територій України, досліджене недостатньо. Це стосується і міста Харків, де рівень пилового навантаження є підвищеним, а його склад ускладнюється за рахунок додаткових джерел забруднення, пов'язаних із руйнуванням міської інфраструктури та проведенням відновлювальних робіт.

Таким чином, існує необхідність проведення досліджень, спрямованих на оцінку не лише кількісних характеристик атмосферного пилу, але й його біологічної дії на рослини. Використання біотестування з застосуванням *Lepidium sativum* L. дозволяє отримати об'єктивну оцінку фітотоксичності пилу в різних функціональних зонах міста.

У зв'язку з цим обраний напрям дослідження є актуальним і науково обґрунтованим, а його результати можуть бути використані для екологічної оцінки стану урбанізованого середовища та удосконалення системи локального моніторингу.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІТОТОКСИЧНОГО ВПЛИВУ АТМОСФЕРНОГО ПИЛУ УРБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА

В процесі роботи були проаналізовані сучасні наукові праці з цієї тематики, а також проведені польові (збір пилу з різних зон міста) та лабораторні (визначення фітотоксичності) дослідження.

Відбір проб атмосферного пилу проводився в місті Харків у трьох типах зон: з інтенсивним транспортним навантаженням (магістралі з високою інтенсивністю руху), у житлових кварталах (міський фон) і в контрольних зонах (рекреаційні зелені зони). Такий вибір обумовлений даними моніторингу якості повітря, згідно з якими найвищі концентрації пилу реєструються поблизу транспортних магістралей міста.

Моніторинг повітря в Харкові за 2025 рік свідчить, що основні перевищення вмісту пилу спостерігаються в зонах з активним транспортним рухом. Це підтверджено даними ДУ «Харківський ОЦКПХ МОЗ», де виявлено, що у місцях проживання поруч з автотранспортними магістралями перевищення ГДК пилу до 1,8 раза трапляється частіше, ніж у інших зонах міста. Це узгоджується із загальною урбоєкологічною моделлю, де транспортні потоки є домінантним джерелом твердих частинок у місті.

Для дослідження обирали рослини, розташовані на висоті 1,0–1,5 м від поверхні ґрунту, що дозволяє мінімізувати вплив вторинного забруднення ґрунтовими частинками. Відбір здійснювали в суху безвітряну погоду. З кожної ділянки відбирали не менше 20–30 листків одного або декількох поширених видів рослин. Рослини обирали різних видів. Осілий пил змивали дистильованою водою у стерильні ємності.

Отримані змиви об'єднували у змішані проби відповідно до типу ділянки, після чого використовували для приготування водних витяжок.

Далі проводили експеримент, в якому в якості тест-об'єкту використовували крес-салат.

Крес-салат (*Lepidium sativum* L.) обрано як тест-об'єкт завдяки його високій чутливості до забруднювачів навколишнього середовища зокрема важких металів,

аерозольних частинок, солей і кислот, реакцію на які можна спостерігати вже при низьких концентраціях. Також він швидко проростає та широкому застосуванню у фітотоксикологічних дослідженнях саме як індикатор фітотоксичності [25].

Крес-салат має дрібне насіння, менше запасів ендосперму відповідно в нього менша різниця між окремими проростками, що дає чіткі статистичні відмінності навіть при малих вибірках [13].

Перед початком експерименту насіння перевіряли на схожість і відбирали однакове за розміром та зовнішнім виглядом. Біотестування проводили у чашках Петрі, на дно яких вкладали фільтрувальний папір.

У кожную чашку висівали по 25 насінин крес-салату, після чого додавали по 5 мл відповідної водної витяжки пилу. Для контролю використовували дистильовану воду.

Чашки розміщували в умовах кімнатної температури (22–25 °C) у місці без прямого сонячного освітлення. Протягом усього експерименту слідкували за тим, щоб папір залишався вологим.

Облік результатів проводили на 5-ту добу. Визначали загальну схожість та довжину коренів і проростків.

Для оцінки фітотоксичності порівнювали отримані показники з контролем. Зменшення схожості або пригнічення росту рослин свідчило про наявність токсичного впливу атмосферного пилу.

Критерієм наявності токсичності у пробі є зниження на 20 і більше відсотків показників, які досліджували порівняно з контролем [10].

Для кількісної оцінки впливу атмосферного пилу на ріст рослин використовували індекс фітотоксичності (А).

Індекс розраховували за формулою:

$$A = \frac{X_k - X_d}{X_k} * 100\% \quad (2.1)$$

Де А – довжина коренів(паростків) у досліді відносно контролю;

X_k – середня довжина кореня у контрольному варіанті, мм.

Xd – середня довжина кореня у дослідному варіанті, мм.

Цей Індекс показує, наскільки зменшився ріст рослин у досліді порівняно з контролем. Якщо корені або проростки у досліді коротші, то можливо зробити висновок, що є токсичність, якщо такі ж, то токсичності немає, а якщо довші, то можна припустити, що можливий стимулюючий ефект.

Для оцінки впливу атмосферного пилу на початкові етапи розвитку рослин визначали загальну схожість насіння крес-салату (*Lepidium sativum* L.).

Загальна схожість показує відсоток насіння, що проросло за весь період експерименту (в нашому досліді на 5-ту добу).

Розрахунок здійснювався за формулою:

$$C = n/N \times 100 \% \quad (2.2)$$

де:

n – загальна кількість пророслих насінин;

N – кількість висіяних насінин.

Визначення загальної схожості насіння є необхідним для оцінки загальної життєздатності та здатності рослин до розвитку в умовах впливу досліджуваних факторів [15].

Загальна схожість відображає кінцевий результат дії токсиканта на насіння. Цей показник дозволяє встановити, яка частка насіння зберігає здатність до проростання після впливу атмосферного пилу.

Зниження схожості свідчить про те, що забруднювачі мають інгібуючий або пошкоджуючий вплив на насіння, що може бути пов'язано з порушенням фізіологічних процесів, таких як водопоглинання, ферментативна активність та клітинний поділ.

Таким чином, визначення загальної схожості є важливим етапом дослідження, оскільки дозволяє оцінити ступінь фітотоксичності досліджуваних зразків та їх потенційний вплив на формування рослинного покриву в урбанізованому середовищі.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЩОДО ФІТОТОКСИЧНОГО ВПЛИВУ ПИЛУ УБАНІЗОВАНОГО СЕРЕДОВИЩА

Відбір проб атмосферного пилу здійснювали на території міста Харків у межах ділянок з різним рівнем антропогенного навантаження. З метою отримання репрезентативних зразків пилу, що безпосередньо взаємодіє з рослинними організмами, відбір проводили з поверхні листків дерев і чагарників різних видів, що відображають реальні умови урбанізованого середовища.

Рослини виконують роль природних акумуляторів атмосферного пилу, оскільки їх листкова поверхня активно затримує тверді частинки, що осідають з повітря. При цьому ефективність накопичення пилу залежить від морфологічних особливостей листків, зокрема їх розміру, шорсткості, наявності опушення та воскового нальоту.

Використання різних видів дерев і чагарників дозволяє зменшити вплив цих індивідуальних особливостей на результати дослідження та отримати більш узагальнену характеристику пилового забруднення території. Такий підхід сприяє підвищенню достовірності результатів і дозволяє уникнути спотворення даних, пов'язаного з вибором одного виду рослин.

Таким чином, відбір пилу з різних видів рослин забезпечує більш повне відображення складу та властивостей атмосферного пилу, що циркулює в досліджуваному середовищі.

У ході проведеного дослідження було здійснено оцінку фітотоксичного впливу атмосферного пилу, відібраного в різних функціональних зонах міста Харків, на ріст і розвиток проростків *Lepidium sativum*. Це найпростіший і найдешевший спосіб провести екологічний моніторинг міста без використання дорогого хімічного обладнання, використовуючи лише біотести.

Проби пилу відбирались у вересні місяці 2026 року у безвітряну погоду, осадків не спостерігалось 16 діб.

Як тест-показники використовували довжину кореня та довжину паростка на 5-ту добу пророщування, а також відсоток інгібування росту відносно контрольного варіанту.

Для коректної порівняльної оцінки проб атмосферного пилу в Харкові ми обрали три основні типи зон (Рис. 3.1).

Зона 1 з високим транспортним навантаженням уздовж магістралей із великим потоком автотранспорту, це просп. Науки (у районі активного руху).

Зона 2. Житлова забудова (міський фон). Ми обрали житловий район Олексіївка поблизу житлових кварталів, але далеко від магістралей. Ці пункти будуть репрезентувати урбаністичний міський фон без сильного джерела пилу, який дає автотранспорт

Зона 3. Олексіївський лісопарк – це зона з низьким впливом антропогену.

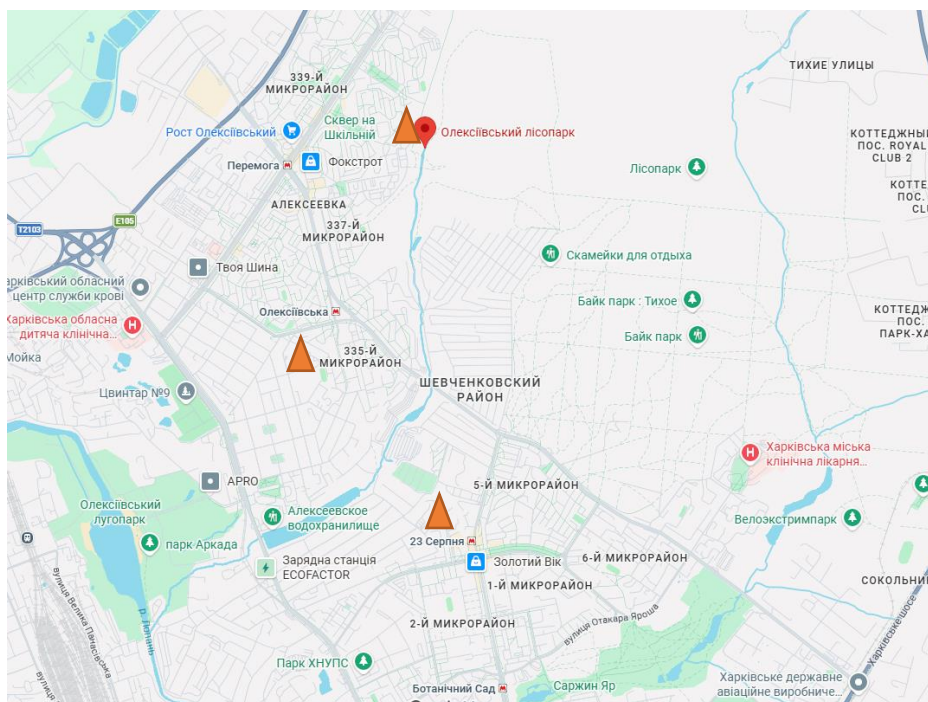


Рис. 3.1 – Місця відбору проб пилу

Таблиця 3.1

Токсикологічна оцінка ґрунтів різних зон
м Харкова на вищих рослинах *Lepidium sativum* L.

Місце відбору проб ґрунту	Довжина, мм				Зменшення довжини відносно контролю (А), %	
	Корені, середнє значення		Паростки, середнє значення			
	Контроль	Дослід	Контроль	Дослід	Корені	Паростки
Зона 1 Проспект Науки	37,36	22,64	28,68	17,68	39,4	38,35
Зона 2 Житлова забудова	37,36	28,84	28,68	21,56	22,8	33,0
Зона 3 Олексіївський лісопарк	37,36	29,56	28,68	22,80	20,9	20,5

Результати дослідження показали, що атмосферний пил суттєво впливає на розвиток кореневої системи проростків.

У контрольному варіанті середня довжина кореня становила 37,36 мм, що відповідає нормальному росту рослин у лабораторних умовах.

У дослідних варіантах спостерігалось зниження цього показника. Так, у зоні інтенсивного транспортного навантаження (проспект Науки) – до 22,64 мм (зменшення на 39,4%), у житловій зоні - до 28,84 мм (зменшення на 22,8%), а у лісопарковій зоні - до 29,56 мм (зменшення на 20,9%).

Отримані результати свідчать про те, що найбільший негативний вплив на ріст коренів спостерігається у зонах з високим рівнем антропогенного навантаження.

Значне інгібування росту кореневої системи можна пояснити тим, що саме корінь є першим органом, який контактує з токсичними речовинами. Забруднювачі, що входять до складу атмосферного пилу, здатні порушувати процеси клітинного поділу та розтягування клітин, що призводить до уповільнення росту.

Аналіз довжини паростків показав аналогічну тенденцію до зниження ростових показників у всіх дослідних варіантах.

У контрольному варіанті середня довжина паростка становила 28,68 мм. У дослідних варіантах цей показник зменшувався. У зоні проспекту Науки - до 17,68 мм (зменшення на 38,35%), у житловій зоні - до 21,56 мм (зменшення на 33,0%), а у лісопарковій зоні - до 22,80 мм (зменшення на 20,5%).

Отримані дані свідчать про те, що атмосферний пил чинить негативний вплив не лише на кореневу систему, але й на надземну частину рослин.

При цьому у житловій зоні спостерігається більш виражене пригнічення росту паростків порівняно з коренями, що може бути пов'язано з комплексною дією різних забруднювачів, у тому числі газоподібних компонентів.

Порівняння токсичності проб ґрунту у відсотках можна побачити на рис. 3.2.

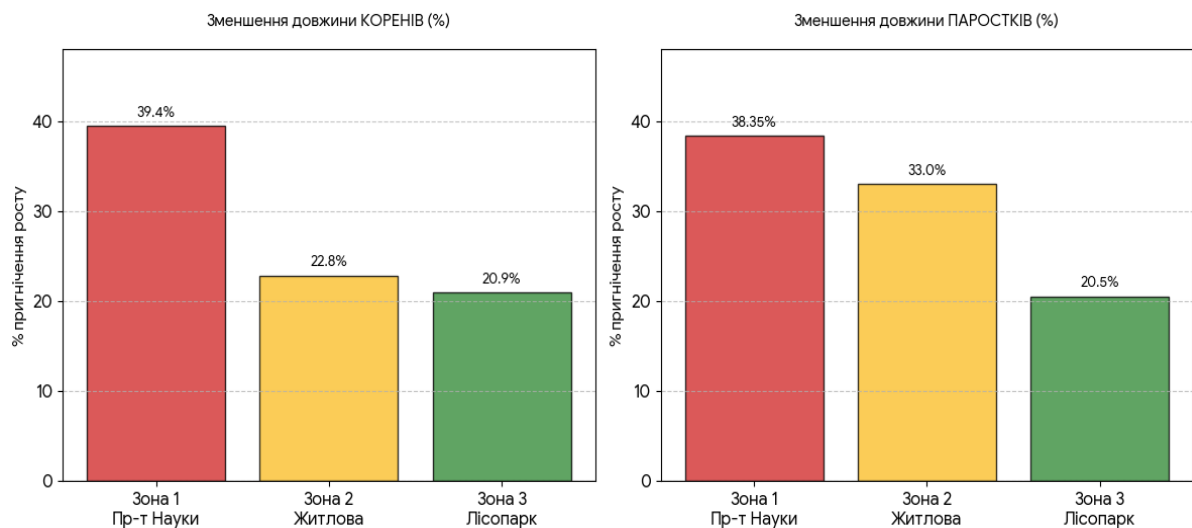


Рис. 3.2 – Порівняння загальної фітотоксичності ґрунту різних функціональних зон міста за допомогою тест - об'єкта (*Lepidium sativum* L.) відносно контролю

Порівняльний аналіз отриманих результатів дозволив встановити чітку залежність між рівнем антропогенного навантаження та ступенем фітотоксичного впливу атмосферного пилу.

Найвищий рівень токсичності зафіксовано у зоні інтенсивного транспортного руху (проспект Науки), де інгібування росту як коренів, так і паростків становило близько 40%.

У житловій зоні рівень токсичності був середнім, тоді як у лісопарковій зоні - найнижчим серед досліджуваних ділянок. Але все одно пил навіть у лісопарковій зоні мав фітотоксичну дію.

Таким чином, встановлено наступний ряд зростання фітотоксичності: транспортна зона > житлова забудова > рекреаційна зона

Виявлені відмінності у ростових показниках рослин можна пояснити різним складом атмосферного пилу в досліджуваних зонах.

У районах з інтенсивним транспортним рухом атмосферний пил містить підвищені концентрації важких металів (свинець, кадмій, цинк), продуктів згоряння палива, дрібнодисперсних частинок.

Ці речовини здатні чинити токсичний вплив на рослини, зокрема порушувати клітинний метаболізм, інгібувати ферментативні процеси та знижувати інтенсивність росту.

Менш виражений ефект у лісопарковій зоні пояснюється наявністю зелених насаджень, які частково затримують пил та зменшують його концентрацію у повітрі.

Водночас навіть у цій зоні зафіксовано зниження ростових показників, що свідчить про наявність фонових забруднень атмосферного повітря у місті Харків.

Отримані результати підтверджують, що атмосферний пил урбанізованого середовища чинить виражений фітотоксичний вплив на рослини, який проявляється у пригніченні проростання та росту.

Найбільш чутливим показником виявилася довжина кореня, що узгоджується з даними інших досліджень і свідчить про доцільність використання цього показника для оцінки токсичності.

Встановлено, що рівень фітотоксичності зростає зі збільшенням антропогенного навантаження, а основним джерелом забруднення в умовах міста є транспорт.

Таким чином, результати дослідження свідчать про наявність чіткої залежності між рівнем урбанізації території та фітотоксичністю атмосферного пилу. Отримані дані можуть бути використані для екологічної оцінки стану міського середовища та обґрунтування заходів щодо зниження рівня пилового забруднення.

Для комплексної оцінки впливу атмосферного пилу на процеси проростання та ріст *Lepidium sativum* було розраховано індекс проростання (GI), який поєднує показники схожості насіння та середньої довжини кореня у дослідному варіанті до відповідного показника контролю за методикою Zucconi et al. [25]. Застосування індексу проростання дозволило більш комплексно оцінити фітотоксичність, оскільки цей показник враховує не лише ріст проростків, але й життєздатність насіння.

Індекс розраховували за формулою:

$$GI = \frac{Gd \times Ld}{Gk \times Lk} * 100\% \quad (3.1)$$

де:

- Gd - схожість у досліді
- Gk - схожість у контролі
- Ld - довжина кореня у досліді
- Lk - довжина кореня у контролі

У пробі атмосферного пилу, відібраного в зоні проспекту Науки, проросло 19 насінин із 25, що свідчить про найнижчий рівень схожості серед усіх досліджуваних ділянок.

У зразках із житлової забудови кількість пророслого насіння становила 22 із 25, що вказує на помірний рівень пригнічення проростання.

Найвищу схожість серед дослідних варіантів зафіксовано для проби з Олексіївського лісопарку, де проросло 23 насінини з 25. Це свідчить про найменший токсичний вплив пилу в рекреаційній зоні.

Результати розрахунку індексу схожості представлено в таблиці 3.2 та Рис. 3.3.

Таблиця 3.2.

Результати розрахунку індексу схожості *Lepidium sativum* в пробах пилу з різних зон м. Харкова

Зона	GI, %	Оцінка
Проспект Науки	46,1	виражена токсичність
Житлова забудова	67,9	помірна токсичність
Олексіївський лісопарк	72,8	слабка токсичність

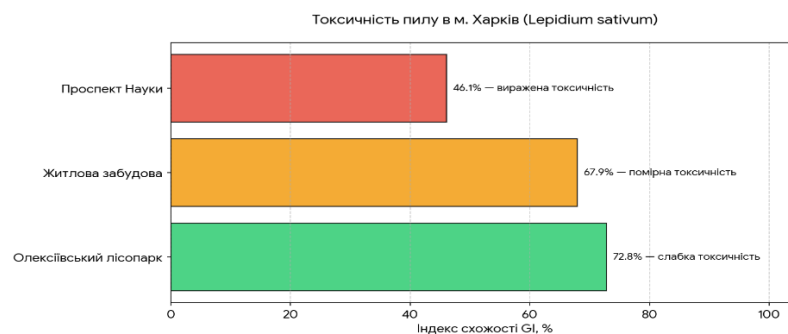


Рис 3.3 – Візуалізація розрахунків індексу схожості

Результати розрахунків показали суттєві відмінності між досліджуваними зонами. Найнижче значення індексу проростання встановлено для проби пилу, відібраної на проспекті Науки - 46,1 %, що свідчить про виражений токсичний вплив атмосферного пилу в зоні інтенсивного транспортного навантаження. Зниження GI у транспортній зоні може бути пов'язане з накопиченням у пилу дрібнодисперсних частинок $PM_{2,5}$ та PM_{10} , продуктів згоряння палива, а також важких металів, які здатні пригнічувати ферментативні процеси проростання та порушувати поділ клітин меристеми кореня.

Для житлової забудови значення GI становило 67,9 %, що відповідає помірного рівню токсичності. В Олексіївському лісопарку індекс проростання був найвищим - 72,8 %, Більш високі значення GI у лісопарковій зоні пояснюються буферною роллю зелених насаджень, які ефективно затримують пил та знижують його концентрацію в атмосферному повітрі. Однак також вказував на наявність слабого токсичного ефекту.

Отримані значення GI підтверджують раніше встановлену закономірність щодо зростання токсичності атмосферного пилу зі збільшенням рівня урбаністичного навантаження.

Для підтвердження достовірності отриманих результатів було проведено статистичну обробку експериментальних даних із використанням критерію Ст'юдента. Аналіз виконували окремо для показників довжини коренів та паростків *Lepidium sativum* у контрольних і дослідних варіантах.

Встановлено, що в усіх досліджуваних зонах фактичні значення критерію Ст'юдента перевищували табличне значення $t_{0,05} = 2,01$, що свідчить про статистично значущу різницю між контролем і дослідними варіантами (Табл. 3.3, 3.4, 3.5).

Таблиця 3.3

Розрахунок фактичного значення критерію Ст'юдента за довжиною коренів та паростків на пр. Науки

Показник	Контроль		Дослід	
	Корень	Паросток	Корень	Паросток
Середнє значення	37,36	28,68	22,64	17,68
Станд. відхилення	3,00	5,74	13,27	11,46
Похибка відхилення станд.	0,60	1,15	2,65	2,29
Критерій Ст'юдента			5,41	4,29

Таблиця 3.4

Розрахунок фактичного значення критерію Ст'юдента за довжиною коренів та паростків в районі житлової забудови

Показник	Контроль		Дослід	
	Корень	Паросток	Корень	Паросток
Середнє значення	37,36	28,68	28,84	21,56
Станд. відхилення	3,00	5,74	11,67	9,33
Похибка станд. відхилення	0,60	1,15	2,33	1,87
Критерій Ст'юдента			3,54	3,25

Таблиця 3.5

Розрахунок фактичного значення критерію Ст'юдента за довжиною коренів та паростків в зоні Олексійовського лісопарку

Показник	Контроль		Дослід	
	Корень	Паросток	Корень	Паросток
Середнє значення	37,36	28,68	29,56	22,80
Станд. відхилення	3,00	5,74	10,52	8,83
Похибка станд. відхилення	0,60	1,15	2,10	1,77
Критерій Ст'юдента			3,56	2,79

Для проби атмосферного пилу, відібраної на проспекті Науки, значення критерію Ст'юдента становило для коренів - 5,41, а для паростків - 4,29.

Це значно перевищує критичний рівень, що підтверджує високий ступінь впливу пилу транспортної зони на ростові процеси проростків.

У пробах із житлової забудови значення t-критерію становили для коренів – 3,54, для паростків – 3,25.

Отримані дані також підтверджують наявність достовірного фітотоксичного ефекту, хоча його інтенсивність була нижчою порівняно з транспортною зоною.

Для проби з Олексіївського лісопарку значення критерію Стьюдента були найменшими серед досліджуваних варіантів для коренів – 3,56, для паростків – 2,79.

Попри менший рівень відхилень, ці значення також перевищували критичне, що свідчить про статистично значущий вплив навіть у рекреаційній зоні.

Додатковий аналіз стандартного відхилення показав, що найбільша варіабельність результатів характерна для транспортної зони, де стандартне відхилення довжини коренів досягало 13,27 мм. Це може бути пов'язано з неоднорідністю складу атмосферного пилу, який у таких умовах містить різні за розміром та хімічним складом частинки.

Менші значення стандартного відхилення в житловій та лісопарковій зонах свідчать про більш стабільний характер впливу пилу на рослини.

Таким чином, статистична обробка підтвердила достовірність встановленої закономірності: зі зростанням антропогенного навантаження підвищується рівень фітотоксичної дії атмосферного пилу, що проявляється у пригніченні росту як кореневої системи, так і надземної частини рослин.

Отримані результати мають практичне значення для екологічної оцінки стану атмосферного повітря в умовах міста Харків. Встановлене пригнічення росту *Lepidium sativum* під впливом водних витяжок атмосферного пилу свідчить про наявність у міському середовищі компонентів, здатних негативно впливати на рослинний покрив.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання методу фітотестування для експрес-оцінки рівня пилового забруднення різних функціональних зон міста, зокрема транспортних магістралей, житлових кварталів та рекреаційних територій.

Запропонований підхід може бути використаний у системі локального екологічного моніторингу, для порівняння екологічного стану районів міста. Також цей підхід добре себе рекомендує при оцінці ефективності озеленення та для вибору ділянок, що потребують першочергових природоохоронних заходів.

Важливість проведеного дослідження додатково зростає в умовах сучасної трансформації міського середовища Харків, що супроводжується локальними порушеннями інфраструктури, за рахунок військової агресії, пошкодженням будівельних конструкцій та активізацією ремонтно-відновлювальних робіт. Такі процеси можуть призводити до збільшення кількості дрібнодисперсного пилу в атмосферному повітрі, зокрема мінеральних частинок будівельного походження, які осідають на поверхні рослин. У зв'язку з цим запропонований метод фітотестування може бути ефективним інструментом для оперативної оцінки екологічного стану міських територій, контролю ефективності заходів з пилопригнічення та наукового обґрунтування систем озеленення в процесі відновлення урбанізованого середовища.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ДОСЛІДЖЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПИЛУ

Під час проведення екологічних досліджень важливе значення має дотримання вимог охорони праці, оскільки навіть лабораторні роботи, пов'язані з біотестуванням атмосферного пилу, можуть супроводжуватися впливом шкідливих факторів на організм людини. Безпечна організація робочого процесу дозволяє зменшити ризик травмування, контакту з токсичними речовинами та виникнення аварійних ситуацій.

Дослідження виконувалися у лабораторному приміщенні, яке відповідає санітарно-гігієнічним вимогам щодо освітлення, вентиляції, температурного режиму та організації робочих місць.

Під час виконання досліджень атмосферного пилу основними небезпечними факторами є дрібнодисперсні пилові частинки, які можуть потрапляти в органи дихання та на слизові оболонки. Особливу небезпеку становить пил, що містить важкі метали, продукти згоряння палива та мінеральні компоненти будівельного походження.

Одним із ризиків є механічне пошкодження шкіри або рук під час роботи зі скляним лабораторним посудом. Також небезпеку можуть становити електричні прилади, які використовуються у лабораторії, тому їх експлуатація повинна здійснюватися відповідно до правил електробезпеки.

Під час роботи важливе значення мають параметри мікроклімату приміщення – температура, вологість повітря та вентиляція. Недостатній повітрообмін може призводити до накопичення пилу в лабораторії та погіршення умов праці.

Під час проведення біотестування необхідно дотримуватися загальних правил лабораторної безпеки. Роботу зі зразками пилу слід проводити у захисних рукавичках, а за необхідності – використовувати маску або

респіратор для запобігання потраплянню дрібних частинок до органів дихання.

Під час приготування водних витяжок атмосферного пилу необхідно уникати різких рухів, які можуть спричинити повторне піднімання пилу в повітря. Усі маніпуляції зі зразками бажано проводити на спеціально підготовленій поверхні, яка легко очищується.

Лабораторний посуд після завершення роботи необхідно ретельно промивати, а використані матеріали та залишки зразків - утилізувати відповідно до санітарних вимог. У разі потрапляння пилу в очі або на слизові оболонки необхідно негайно промити їх великою кількістю води.

Для зменшення впливу пилу на працівників лабораторії необхідно забезпечити ефективну вентиляцію приміщення та регулярно проводити вологе прибирання. Це дозволяє знизити концентрацію дрібнодисперсних частинок у повітрі.

Під час роботи зі зразками атмосферного пилу рекомендується використовувати засоби індивідуального захисту - рукавички та захисні маски. Важливим профілактичним заходом є також правильне зберігання зразків у закритих контейнерах.

У ширшому екологічному аспекті важливими заходами зниження пилового навантаження у місті є озеленення територій, підтримання належного стану дорожнього покриття, контроль будівельних робіт та зменшення викидів автотранспорту. Зелені насадження здатні затримувати значну кількість пилу та частково очищати атмосферне повітря.

Лабораторні приміщення повинні бути обладнані засобами пожежогасіння та відповідати вимогам пожежної безпеки. Основними причинами виникнення пожеж у лабораторіях можуть бути несправність електроприладів, коротке замикання або порушення правил експлуатації обладнання.

Усі електричні прилади необхідно вимикати після завершення роботи. Забороняється користуватися пошкодженими проводами або несправними

розетками. У лабораторії повинні бути вогнегасники та план евакуації у разі виникнення пожежі.

У випадку аварійної ситуації необхідно негайно повідомити відповідальних осіб, вимкнути електроживлення та, за можливості, розпочати первинне гасіння пожежі відповідними засобами.

Отже, під час проведення досліджень атмосферного пилу необхідно дотримуватися вимог охорони праці, оскільки пилові частинки можуть становити небезпеку для органів дихання та загального стану здоров'я людини. Використання засобів індивідуального захисту, належна організація робочого місця, дотримання санітарно-гігієнічних вимог і правил пожежної безпеки дозволяють забезпечити безпечне виконання лабораторних досліджень.

ВИСНОВКИ

1. У результаті проведеного дослідження встановлено, що атмосферний пил урбанізованого середовища міста Харків чинить виражений фітотоксичний вплив на тест-об'єкт *Lepidium sativum* L., який проявляється у пригніченні росту кореневої системи, паростків та зниженні схожості насіння.

2. Виявлено чітку залежність між рівнем антропогенного навантаження функціональної зони та ступенем токсичності пилу. Найвищі показники інгібування росту зафіксовано у транспортній зоні (проспект Науки), де зменшення довжини коренів становило 39,4 %, а паростків - 38,35 %. У житловій зоні ці показники були нижчими (22,8 % та 33,0 % відповідно), а найменші значення встановлено в рекреаційній зоні Олексіївського лісопарку (20,9 % та 20,5 %).

3. За результатами розрахунку індексу проростання (GI) встановлено, що найбільш токсичним є пил транспортної зони, для якого значення GI становило 46,1 %, що відповідає вираженій токсичності. Для житлової забудови GI дорівнював 67,9 % (помірна токсичність), а для лісопаркової зони - 72,8 % (слабка токсичність). Це підтвердило закономірність зростання токсичності зі збільшенням урбаністичного навантаження.

4. Встановлено, що найбільш чутливим тест-показником є довжина кореня, оскільки коренева система першою контактує з токсичними компонентами водних витяжок пилу та швидше реагує на наявність важких металів, продуктів згоряння палива й дрібнодисперсних частинок.

5. Статистична обробка результатів із використанням критерію Стюдента підтвердила достовірність виявлених відмінностей між контрольними та дослідними варіантами в усіх функціональних зонах міста, оскільки фактичні значення t-критерію перевищували критичний рівень $t_{0,05} = 2,01$.

6. Доведено, що в умовах Харкова основним джерелом формування фітотоксичного атмосферного пилу є транспортне навантаження, а додатковими чинниками в сучасних умовах виступають наслідки військових дій, руйнування будівельних конструкцій, пошкодження дорожнього покриття та активні відновлювальні роботи, що сприяють збільшенню вмісту дрібнодисперсних мінеральних частинок у повітрі.

7. Практично підтверджено, що метод фітотестування з використанням *Lepidium sativum* L. є ефективним, простим та економічно доступним інструментом експрес-оцінки пилового забруднення урбанізованого середовища, який доцільно застосовувати у системі локального екологічного моніторингу міста, при оцінці ефективності озеленення та під час екологічного супроводу відновлення міської інфраструктури.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алимов О. М. Основи екології населених пунктів. Київ : Либідь, 2015. 248 с.
2. Вплив техногенного забруднення на рослинний покрив міських територій // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 3. URL: <https://journals.uran.ua/eejet/article/view/297718> (дата звернення: 24.04.2026).
3. Геохімічні особливості забруднення міських територій важкими металами // *Геологічний журнал*. 2020. URL: <https://geojournal.igs-nas.org.ua/article/view/200245> (дата звернення: 24.04.2026).
4. Гранично допустимі концентрації (ГДК) забруднюючих речовин в атмосферному повітрі населених місць : затв. МОЗ України від 11.02.2015. Київ, 2015.
5. Гродзинський Д. М. Основи хімічної екології. Київ : Либідь, 1993. 224 с.
6. Дослідження впливу важких металів на рослини в урбанізованих екосистемах // *Агрохімія і ґрунтознавство*. URL: <https://agrochemsoilsci.org/index.php/journal/article/view/151> (дата звернення: 24.04.2026).
7. ДСП 201-97. Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць. Київ, 1997. 28 с.
8. Кабата-Пендіас А., Пендіас Х. Мікроелементи в ґрунтах і рослинах / пер. з англ. Київ : Світ, 1999. 285 с.
9. Крайнюков О. М., Кривицька І. А. Удосконалення способу визначення ступеня забрудненості ґрунтів методом біотестування. *Вісник ЗНУ. Біологічні науки*. 2018. № 1. С. 83–90.
10. Крайнюкова А. М. Методика визначення токсичності ґрунтів на вищих рослинах. Київ : УкрНДІЕП, 1997. 17 с.
11. Кривицька І. А. Біологічний моніторинг ґрунтів рекреаційних зон м. Маріуполь. *Екологічні науки*. 2019. № 1 (24). С. 66–70.

12. Кучерявий В. П. Урбоекологія : підручник. Львів : Світ, 2001. 440 с.
13. Мусієнко М. М., Серебряков В. В., Брайон О. В. Фізіологія рослин : підручник. Київ : Либідь, 2005. 808 с.
14. Одум Ю. Екологія : у 2 т. / пер. з англ. Київ : Либідь, 1998. Т. 1. 312 с.
15. Оцінка екологічного стану урбанізованих територій за біотест-показниками // *Environmental Engineering Journal*. 2022. URL: <https://en.uran.ua/index.php/en/article/view/292> (дата звернення: 24.04.2026).
16. Оцінка фітотоксичності ґрунтів урбанізованих територій // *Геотехнічна механіка*. 2021. URL: <https://journals.igns.kyiv.ua/index.php/geotech/article/view/73> (дата звернення: 24.04.2026).
17. Плахта І. В., Мельник О. В. Застосування біоіндикаційних методів для оцінки стану урбанізованого середовища. *Екологічний журнал*. 2020. № 1 (45). С. 32–38.
18. Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря : Постанова Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 № 827. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-п> (дата звернення: 24.04.2026).
19. Про охорону атмосферного повітря : Закон України від 16.10.1992 № 2707-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12> (дата звернення: 24.04.2026).
20. Сучасні проблеми пилового забруднення урбанізованих територій // *Вісник Одеського національного університету. Географія*. 2022. URL: <https://visgeo.onu.edu.ua/article/view/332359> (дата звернення: 24.04.2026).
21. Шевчук В. В. Екологічна безпека України: проблеми та шляхи вирішення. Київ : Наукова думка, 2020. 312 с.
22. Air pollution and its impact on plant growth in urban environments // *SN Applied Sciences*. 2021. Vol. 3. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-021-04745-8> (дата звернення: 24.04.2026).

23. Assessing the deposition of heavy metals in edaphotopes and synantrophy vegetation under the conditions of technological pollution of the city / O. Yehorova, L. Zhytska, V. Bakharev, O. Mislyuk, E. Khomenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 1, № 10 (127). P. 15–26.

24. Atmospheric particulate matter and urban pollution // *Ukrainian Journal of Medicine, Biology and Sport*. 2020. URL: <https://uhmj.org.ua/index.php/journal/article/download/171/167/> (дата звернення: 24.04.2026).

25. Zucconi F., Monaco A., Forte M., de Bertoldi M. Phytotoxins during the stabilization of organic matter // *BioCycle*. 1981. Vol. 22. P. 54–57.