

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет агротехнологій та природокористування

Кафедра екології та ботаніки

До захисту допускається
Завідувач кафедри екології та ботаніки

_____ Інна ЗУБЦОВА

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим рівнем вищої освіти

на тему

**«ОЦІНКА ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ М. СУМИ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ ПРИЛАДОВОЇ БАЗИ ТА МЕТОДОМ
БІОІНДИКАЦІЇ»**

Виконала: Дар'я ТКАЧЕНКО

Група: ЕКО 2401м

Науковий керівник: Людмила БОНДАРЄВА

Рецензент: Сергій БЕРДІН

Суми – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *агротехнологій та природокористування*
Кафедра *екології та ботаніки*
Освітній ступінь – «Магістр»
Спеціальність – 101 «Екологія»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Зав. кафедрою _____ В.Г. Скляр

«__» _____ 202__ р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну роботу студентіві

Ткаченко Дар'ї Сергіївні

1. Тема роботи: «Оцінка якості атмосферного повітря м. Суми із застосуванням приладової бази та методом біоіндикації»

Затверджено наказом по університету від " _____ " _____ 2025 р. № _____

2. Термін здачі студенткою закінченої роботи на кафедрі: " __ " __ 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: дані офіційного моніторингу атмосферного повітря м. Суми за 2021-2024 рр.; стандартна методика ліхеноіндикації; методика оцінки флуктуючої асиметрії листкової пластинки берези повислої (*Betula pendula* Roth.); статистичний пакет STATISTICA 10.0 для обробки даних.

4. Перелік завдань, які будуть виконуватися в роботі:

1. проаналізувати сучасні підходи до оцінки якості атмосферного повітря з використанням приладових та біоіндикаційних методів;
2. визначити показники флуктуючої асиметрії листків *Betula pendula* та провести ліхеноіндикаційну оцінку на п'яти точках дослідження, що представляють градієнт антропогенного навантаження;
3. провести статистичний аналіз отриманих даних, встановити кореляційні зв'язки між біоіндикаційними показниками та даними офіційного інструментального моніторингу, розробити рекомендації щодо покращення стану атмосферного повітря критичних зон м. Суми.

Студентка _____ Ткаченко Д.С.

Науковий керівник _____ Бондарєва Л.М.

Дата видачі завдання: " _____ " _____ 2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
Виконання кваліфікаційної роботи
здобувача вищої освіти спеціальності 101 «Екологія» (група ЕКО 2401м)
за темою «Оцінка якості атмосферного повітря м. Суми із застосуванням приладової бази та методом біоіндикації»

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1	Визначення об'єкту, предмету дослідження, формулювання мети та задач кваліфікаційної роботи, складання плану	Вересень-жовтень 2024 року	
2	Підбір та вивчення літературних джерел, законодавчої та нормативної бази	Листопад-грудень 2024 року	
3	Узагальнення теоретичного матеріалу з обраної теми дослідження та представлення чорнового варіанту першого розділу кваліфікаційної роботи	Січень 2025 року	
4	Збір та узагальнення матеріалу про регіон досліджень, підготовка відповідного тексту кваліфікаційної роботи	Лютий-березень 2025 року	
5	Вибір та вивчення методів досліджень, які будуть використані при підготовці кваліфікаційної роботи, оформлення відповідного тексту кваліфікаційної роботи	Квітень 2025 року	
6	Збір та обробка фактичного (експериментального) матеріалу, у тому числі за результатами проходження виробничої практики	Травень-вересень 2025 року	
7	Оформлення теоретичної частини кваліфікаційної роботи, узагальнення експериментальної частини, захист звіту по виробничій практиці	Перша-друга декада жовтня 2025 року	
8	Завершення експериментальної частини кваліфікаційної роботи та подання попереднього варіанту експериментального розділу керівнику	Третя декада жовтня 2025 року	
9	Перевірка кваліфікаційної роботи на автентичність (подання роботи для перевірки на плагіат на кафедрі, до відділу якості освіти)	Перша декада листопаду 2025 року	
10	Остаточне оформлення кваліфікаційної роботи, та її подання на попередній захист та рецензування	Друга декада листопаду 2025 року	
11	Подання закінченої роботи та документів до неї	Третя декада листопаду 2025 року	
12	Захист кваліфікаційної роботи	Грудень 2025 року	

Керівник роботи

(підпис)

Людмила БОНДАРЄВА

(Прізвище, ініціали)

Здобувач

(підпис)

Дар'я ТКАЧЕНКО

(Прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Ткаченко Д.С. Оцінка якості атмосферного повітря м. Суми із застосуванням приладової бази та методом біоіндикації. Кваліфікаційна робота за другим (магістерським) освітнім рівнем вищої освіти. Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Кваліфікаційна робота присвячена комплексній оцінці якості атмосферного повітря м. Суми шляхом інтеграції традиційного інструментального моніторингу з методами біоіндикації – ліхеноіндикацією та оцінкою флуктуючої асиметрії листків берези повислої (*Betula pendula* Roth.). Робота виконана на кафедрі екології та ботаніки Сумського національного аграрного університету за освітньою програмою «Екологія» спеціальності 101 Екологія.

Дослідження проводились на п'яти точках, що представляють градієнт антропогенного навантаження: ПЗ «Михайлівська цілина» (фонова територія), територія СНАУ (умовно фонова), ПСЗ №3 (вул. Холодноярської бригади), ПСЗ №4 (вул. Харківська), ПСЗ №5 (вул. Металургів). На кожній точці обстежено 7 дерев берези повислої, з кожного дерева відібрано по 10 листків. Проведено морфометричні вимірювання п'яти білатеральних ознак на 350 листках та ліхеноіндикаційні дослідження з визначенням показника відносної чистоти атмосфери Q. Статистична обробка виконана з використанням пакету STATISTICA 10.0.

Встановлено чіткий просторовий градієнт забруднення: показники флуктуючої асиметрії зростають від 0,028 до 0,094, показник Q знижується від 0,72 до 0,27. Однофакторний дисперсійний аналіз підтвердив високу статистичну значущість міжгрупових відмінностей ($F(4,30) = 84,917$, $p < 0,001$), територіальний фактор пояснює 91,9% варіабельності показників. Встановлено високу узгодженість результатів біоіндикації з даними офіційного інструментального моніторингу: зони максимального забруднення за даними ПСЗ (перевищення ГДК по пилу до 2,8 разів, по діоксиду азоту до 1,4 разів) співпадають з критичними біоіндикаційними показниками. Кореляція між двома методами біоіндикації становить $r = -0,924$ ($p < 0,05$).

Виявлено критичний екологічний стан у районі дитячого садка «Теремок»: максимальна флуктуюча асиметрія 0,100, мінімальна ліхеноіндикація $Q = 0,27$. Розроблено пропозиції щодо покращення екологічного стану критичних зон. Проведення досліджень в умовах воєнного стану підтвердило стійкість біоіндикаційних методів до екстремальних умов.

Ключові слова: якість атмосферного повітря, біоіндикація, ліхеноіндикація, флуктуюча асиметрія, *Betula pendula*, екологічний моніторинг, забруднення атмосфери, місто Суми.

ANNOTATION

Tkachenko D.S. Assessment of air quality in Sumy using instrumental methods and bioindication. Master's qualification work (second level of higher education). Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The qualification work is devoted to a comprehensive assessment of atmospheric air quality in Sumy through integration of traditional instrumental monitoring with bioindication methods – lichenoidication and fluctuating asymmetry assessment of silver birch (*Betula pendula* Roth.) leaves. The work was performed at the Department of Ecology and Botany of Sumy National Agrarian University under the educational program "Ecology", specialty 101 Ecology.

Studies were conducted at five sites representing a gradient of anthropogenic impact: Nature Reserve "Mykhailivska Tsilyna" (background territory), SNAU territory (conditionally background), monitoring station No.3 (Kholodnoyarskoi Brigady St.), monitoring station No.4 (Kharkivska St.), monitoring station No.5 (Metalurhiv St.). At each site, 7 birch trees were examined, with 10 leaves collected from each tree. Morphometric measurements of five bilateral features were performed on 350 leaves, and lichenoidication studies were conducted to determine the relative atmospheric purity index Q. Statistical data processing was performed using STATISTICA 10.0.

A clear spatial gradient of air pollution was established: fluctuating asymmetry indicators increase from 0.028 to 0.094, lichenoidication index Q decreases from 0.72 to 0.27. One-way ANOVA confirmed high statistical significance of intergroup differences ($F(4,30) = 84.917$, $p < 0.001$), territorial factor explains 91.9% of indicators variability. High consistency of bioindication results with official instrumental monitoring data was established: zones of maximum pollution according to monitoring stations (exceedance of MPC for dust up to 2.8 times, for nitrogen dioxide up to 1.4 times) coincide with critical bioindication indicators. Correlation between two bioindication methods is $r = -0.924$ ($p < 0.05$).

Critical ecological condition was revealed in the area of kindergarten "Teremok": maximum fluctuating asymmetry 0.100, minimum lichenoidication $Q = 0.27$. A set of recommendations for improving the ecological condition of critical zones was developed. Conducting research under martial law confirmed the resistance of bioindication methods to extreme conditions.

Keywords: atmospheric air quality, bioindication, lichenoidication, fluctuating asymmetry, *Betula pendula*, ecological monitoring, air pollution, Sumy city.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИЛАДОВИХ ТА БІОІНДИКАЦІЙНИХ МЕТОДІВ (огляд літератури).....	11
1.1. Теоретичні засади біоіндикації та її місце в системі екологічного моніторингу.....	11
1.2. Ліхеноіндикація: світовий досвід та методологічні аспекти.....	12
1.3. Флуктуюча асиметрія як індикатор стабільності розвитку організмів.....	15
1.4. Комплексні підходи до біоіндикаційного моніторингу та інтеграція методів.....	18
1.5. Приладові методи моніторингу: можливості та обмеження.....	20
1.6. Регіональні особливості та перспективи розвитку.....	22
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	25
2.1. Об'єкт та предмет досліджень.....	25
2.2. Характеристика району та умов проведення досліджень.....	26
РОЗДІЛ 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	28
3.1. Загальна характеристика методів дослідження.....	28
3.2. Характеристика об'єкту дослідження.....	28
3.3. Використання даних офіційного приладового моніторингу для порівняльного аналізу.....	29
3.4. Методика ліхеноіндикації.....	30
3.5. Методика визначення флуктуючої асиметрії.....	31
РОЗДІЛ 4. БІОІНДИКАЦІЙНА ОЦІНКА ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ М. СУМИ.....	35
4.1. Загальна характеристика досліджуваних точок.....	35
4.2. Результати оцінки флуктуючої асиметрії листків <i>Betula pendula</i>	36
4.3. Результати ліхеноіндикації атмосферного повітря.....	45
4.4. Статистична обробка результатів досліджень.....	48
4.5. Порівняльний аналіз результатів біоіндикації та узгодженість з інструментальним моніторингом.....	55
ВИСНОВКИ.....	60
ПРОПОЗИЦІЇ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	63
ДОДАТКИ.....	70

ВСТУП

Актуальність теми. Забруднення атмосферного повітря є однією з найгостріших екологічних проблем урбанізованих територій. За даними ВООЗ, щорічно близько 7 мільйонів смертей у світі пов'язані з впливом забрудненого повітря. В Україні проблема набула особливої гостроти через тривалу експлуатацію промислових підприємств радянської доби з застарілим обладнанням та зростаючу автомобілізацію.

Традиційний інструментальний моніторинг має суттєві обмеження: висока вартість, обмежена просторова щільність постів, неможливість оцінки біологічних наслідків. Біоіндикаційні методи дозволяють отримати інтегральну оцінку за тривалий період, виявити синергічні ефекти забруднювачів та оцінити біологічні наслідки на рівнях, недоступних для приладів. Проведення досліджень в умовах війни додає актуальності, оскільки бойові дії створюють додаткові джерела забруднення та ускладнюють традиційний моніторинг.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема кваліфікаційної роботи відповідає науково-дослідній роботі кафедри екології та ботаніки Сумського національного аграрного університету у межах виконання теми «Інвентаризація біорізноманіття та комплексний популяційний аналіз рослинного покриву Північно-Східної України» (номер державної реєстрації: 0121U113245).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є комплексна оцінка якості атмосферного повітря м. Суми шляхом інтеграції даних інструментального моніторингу з результатами біоіндикації для виявлення критичних зон та розробки природоохоронних рекомендацій.

Завдання дослідження:

- провести аналіз літературних джерел щодо сучасних підходів до оцінки якості атмосферного повітря;
- визначити показники флуктуючої асиметрії *Betula pendula* на територіях з різним рівнем навантаження;

- оцінити якість повітря методом ліхеноіндикації з визначенням показника Q;
- провести статистичний аналіз для встановлення просторового градієнту забруднення;
- встановити кореляційні зв'язки між біоіндикацією та офіційним моніторингом;
- розробити рекомендації щодо покращення екологічного стану критичних зон.

Об'єкт дослідження: атмосферне повітря урбанізованих територій м. Суми.

Предмет дослідження: закономірності просторового розподілу забруднення та відповіді біологічних систем. Показники якості атмосферного повітря, визначені приладовими методами та методами біоіндикації.

Методи досліджень. Польові дослідження: відбір 350 листків *Betula pendula* з 35 дерев на 5 точках, обстеження епіфітних лишайників. Морфометричний аналіз з використанням штангенциркуля, транспортира, додатку LeafByte. Статистична обробка: STATISTICA 10.0 (описова статистика, ANOVA, Tukey HSD, кореляційний аналіз). Порівняльний аналіз з даними Сумського обласного центру з гідрометеорології за 2021-2023 рр.

Наукова новизна одержаних результатів. Вперше для м. Суми проведено комплексну оцінку з одночасним застосуванням двох методів біоіндикації та їх валідацією через порівняння з інструментальним моніторингом. Встановлено кількісні параметри градієнту забруднення, вперше виявлено критичний стан у районі дитсадку «Теремок».

Практичне значення одержаних результатів. Виявлені критичні зони потребують термінових природоохоронних заходів. Розроблено рекомендації для органів місцевого самоврядування. Встановлена узгодженість біоіндикаційних та інструментальних методів обґрунтовує впровадження економічно ефективних біоіндикаційних підходів у систему моніторингу. Створена база даних для багаторічного моніторингу та післявоєнної реабілітації. Результати можуть використовуватись у викладанні дисциплін «Екологічний

моніторинг», «Біоіндикація», «Урбоекологія». Сформульовані пропозиції щодо заходів захисту здоров'я населення у критичних зонах.

Особистий внесок здобувача. Протягом вегетаційних сезонів 2024-2025 років особисто автором проведено аналіз літератури, планування досліджень, збір первинного матеріалу, морфометричні вимірювання, розрахунки, статистична обробка та аналіз результатів, формулювання висновків та пропозицій. В процесі написання кваліфікаційної роботи з метою поглиблення знань в галузі оцінки впливу на довкілля, було взято участь у міжнародних заходах: онлайн-курс «War-Affected Landscapes in the Eastern Partnership Region: Environmental Impacts, Civil Society Response, and Green Recovery»; онлайн-симпозіум «Regional Resilience through International Eco-Skills Development» (Додаток А).

Апробація результатів роботи. Результати доповідались на III Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічні проблеми сучасності» (Дрогобич, 20 травня 2025 р.), Науково-практичній конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (14 – 18 квітня 2025 р.: 17 – 21 листопада 2025 р.).

Публікації. Результати досліджень опубліковані (Додаток Б):

1. Заїка Д. С. Інструментальні та біоіндикаційні методи в системі екологічного моніторингу атмосферного повітря урбанізованих територій. Екологічні проблеми сучасності : зб. матеріалів III Міжнар. наук.-практ. конф. (Дрогобич, 20 трав. 2025 р.). Дрогобич : ДВНЗ «ДонНТУ», 2025. С. 104–107.

2. Заїка Д. С. Сучасні біоіндикаційні підходи щодо дослідження ступеня техногенного навантаження за допомогою флуктуючої асиметрії листкової пластинки. Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (14-18 квітня 2025 р.). Суми, 2025. С. 37.

3. Ткаченко Д.С. Комплексна біоіндикаційна оцінка якості атмосферного повітря в м. Суми в умовах воєнного стану. Матеріали науково-практичної конференції викладачів, аспірантів та студентів Сумського НАУ (17 – 21 листопада 2025 р.). Суми, 2025. С.69.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, рекомендацій, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи становить 81 сторінок, з них 63 сторінок основного тексту. Робота містить 14 таблиць, 6 рисунків, 4 додатків. Список використаних джерел включає 61 найменування, з них 25 іноземними мовами.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ЯКОСТІ
АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ
(Огляд літератури)

1.1. Теоретичні засади біоіндикації та її місце в системі екологічного моніторингу

Біоіндикація як науковий напрямок представляє собою комплекс методів оцінки стану навколишнього середовища за допомогою живих організмів, здатних специфічно реагувати на зміни якості довкілля [5]. Фундаментальні теоретичні принципи біоіндикації ґрунтуються на концепції стрес-реакції живих систем та здатності організмів інтегрувати вплив множинних факторів довкілля протягом тривалого періоду [44].

Концептуальна модель біоіндикації базується на розумінні того, що живі організми є природними «інтеграторами» екологічних умов, здатними накопичувати та відображати кумулятивний ефект довгострокової дії забруднювачів [48]. На відміну від приладових методів, що фіксують миттєві концентрації окремих забруднювачів, біоіндикатори відображають сумарний вплив усього комплексу факторів, включаючи синергічні та антагоністичні ефекти їх взаємодії [2].

Теоретичні засади біоіндикації ґрунтуються на принципі екологічної чутливості - здатності різних видів організмів по-різному реагувати на зміни якості довкілля залежно від їх біологічних особливостей та екологічних потреб. Ця диференційована чутливість дозволяє створювати градуйовані шкали оцінки екологічного стану та виявляти різні рівні антропогенного впливу [5].

Методологічна перевага біоіндикації полягає у здатності виявляти біологічні ефекти забруднення на ранніх стадіях, коли концентрації поллютантів ще не досягли критичних рівнів, але вже призводять до порушень у функціонуванні живих систем [44]. Особливо цінною є можливість виявлення

синергічної дії різних забруднювачів та їх впливу при концентраціях нижче порогів чутливості приладів.

Класифікація біоіндикаторів базується на різних критеріях та включає: за типом відповіді - індикатори присутності/відсутності, накопичення та ефекту; за рівнем організації - молекулярні, клітинні, організмові, популяційні та екосистемні; за специфічністю - специфічні та неспецифічні індикатори. Кожен тип має свої переваги та обмеження, що визначає область застосування [48].

Інтеграція біоіндикаційних методів у систему екологічного моніторингу дозволяє суттєво розширити можливості оцінки якості довкілля. Якщо традиційні приладові методи забезпечують точні кількісні дані про концентрації конкретних забруднювачів у реальному часі, то біоіндикація надає інформацію про біологічні наслідки забруднення та його довгострокові ефекти [3].

Сучасна концепція екосистемного здоров'я, що активно розвивається у світовій екологічній науці, базується саме на біоіндикаційних підходах. Згідно з цією концепцією, справжня оцінка якості довкілля можлива лише через аналіз стану живих компонентів екосистем, оскільки саме вони є кінцевими реципієнтами всіх антропогенних впливів [44].

Економічні переваги біоіндикації включають відносно низьку вартість досліджень, можливість широкого просторового охоплення територій та залучення громадськості до процесу моніторингу. Це особливо актуально для країн з обмеженими ресурсами на екологічний моніторинг, де біоіндикаційні методи можуть слугувати ефективним доповненням до дорогих інструментальних вимірювань [58].

1.2. Ліхеноіндикація: світовий досвід та методологічні аспекти

Лишайники як об'єкти біоіндикації займають особливе місце завдяки своїм унікальним біологічним властивостям [40]. Симбіотична природа лишайників, що представляє собою облігатне співжиття гриба (мікобіонта) та водорості або

ціанобактерії (фікобійнта), зумовлює їх надзвичайну чутливість до змін хімічного складу атмосферного повітря [48].

Фізіологічні механізми чутливості лишайників до забруднення пов'язані з особливостями їх метаболізму та морфологічної будови. Відсутність кутикули та кореневої системи забезпечує пряме поглинання всіх необхідних речовин безпосередньо з атмосфери через поверхню таллону [40]. Це робить лишайники особливо вразливими до атмосферних забруднювачів, які легко проникають у тканини та порушують делікатний баланс симбіотичних відносин.

Морфологічна різноманітність лишайників створює основу для їх використання як градуїованої системи біоіндикації. За зовнішнім виглядом таллону розрізняють три основні типи: накипні (найстійкіші до забруднення), листоваті (проміжна стійкість) та куцисті (найчутливіші) лишайники. Така градація чутливості дозволяє створювати детальні шкали оцінки якості атмосферного повітря [10].

Світовий досвід застосування ліхеноіндикації демонструє її ефективність для контролю різних типів забруднювачів. Європейські програми моніторингу показують високі кореляції між видовим різноманіттям лишайників та концентраціями діоксиду сірки, оксидів азоту та інших фітотоксичних газів [40]. Північноамериканські дослідження підтверджують можливість використання лишайників для контролю кислотних опадів та оцінки ефективності природоохоронних заходів.

Сучасні міжнародні дослідження розширюють сферу застосування ліхеноіндикації на нові типи забруднювачів. Роботи малайзійських науковців [37, 38, 39] демонструють успішне використання лишайників для контролю важких металів та специфічних забруднювачів, включаючи тютюновий дим у громадських будівлях. Розроблений ними індекс біорізноманіття лишайників показав високу кореляцію з даними інструментального моніторингу навіть в умовах тропічного клімату.

Італійські дослідження [42, 52] підтверджують можливість ліхеноіндикації для оцінки впливу специфічних джерел забруднення, включаючи заходи з

відновлення після землетрусу та спалювання твердих побутових відходів. Особливо цінними є результати, що демонструють здатність лишайників виявляти біологічні ефекти навіть при дотриманні офіційних нормативів викидів.

Піонерські дослідження використання лишайників для виявлення мікропластику в атмосферному повітрі [45] відкривають нові перспективи контролю цього нового типу забруднення. Результати досліджень у Мілані показали, що лишайники здатні накопичувати мікрочастинки пластику та можуть слугувати індикаторами їх просторового розподілу в урбанізованому середовищі.

Дослідження південноафриканських учених [48] продемонстрували ефективність використання лишайників *Parmelia caperata* для оцінки забруднення атмосферного повітря ртуттю. Кореляційний аналіз між концентраціями ртуті в лишайниках та атмосферному повітрі показав коефіцієнти кореляції понад 0.85, що підтверджує високу точність біоіндикаційного методу.

Азіатський досвід ліхеноіндикації [61] розширює розуміння можливостей методу в умовах специфічних типів забруднення. Корейські дослідження показали, що лишайники здатні накопичувати широкий спектр важких металів та можуть використовуватись не лише як індикатори, але й як біомонітори для кількісної оцінки забруднення.

В українському контексті ліхеноіндикація має багаторічну історію розвитку, що започаткована фундаментальними роботами Кондратюка [10]. Систематичний аналіз ліхенофлори України заклав теоретичні основи для розвитку національної школи біомоніторингу та створення регіональних методик оцінки якості повітря.

Київські дослідження Димитрової [4] встановили чіткі закономірності розподілу лишайників у великому мегаполісі. Авторка виявила формування концентричних зон різного ступеня забруднення: центральні частини міста характеризуються практично повною відсутністю лишайників («лишайникова

пустеля»), проміжні зони - домінуванням накипних форм, а периферійні райони - присутністю листуватих та поодиноких кущистих видів.

Регіональні дослідження в Харкові [30], Івано-Франківську [9] та Василькові [36] підтвердили універсальність ліхеноіндикаційного підходу для українських міст різного масштабу. Особливо важливими є результати для промислових центрів, де встановлені градієнти забруднення часто не співпадають з даними офіційного моніторингу, що підкреслює комплементарність біологічних та інструментальних методів.

Для Сумської області особливе значення мають дослідження Литвиненка та співавторів [15, 16], які розробили методичні підходи ліхеноіндикації для промислових та малих міських територій. Встановлені кореляції між ступенем забруднення та видовим складом лишайників створюють основу для розширення біоіндикаційних досліджень у регіоні.

1.3. Флуктуюча асиметрія як індикатор стабільності розвитку організмів

Концепція флуктуючої асиметрії як індикатора стабільності розвитку базується на фундаментальних принципах біології розвитку та популяційної генетики [47, 50]. Флуктуюча асиметрія представляє собою незначні ненаправлені відхилення від строгої білатеральної симетрії морфологічних структур, що відображують порушення онтогенетичного гомеостазу під впливом стресових факторів.

Теоретичне обґрунтування методу ґрунтується на концепції стабільності розвитку - здатності організму підтримувати нормальний розвиток в умовах генетичних та екологічних пертурбацій [47]. Згідно з цією теорією, симетричний розвиток є наслідком точної координації генетичних програм розвитку, а відхилення від симетрії відображають «онтогенетичний шум», що накопичується під впливом несприятливих факторів.

Фундаментальні дослідження Palmer та Strobeck [50] встановили основні принципи аналізу флуктуючої асиметрії та її відмінності від інших типів асиметрії. Автори розробили статистичні критерії для виявлення справжньої флуктуючої асиметрії та методи її кількісної оцінки, що стали основою для подальших досліджень у цій галузі.

Генетичні та еволюційні аспекти флуктуючої асиметрії детально проаналізовані Leamy та Klingenberg [46]. Автори показали, що рівень асиметрії контролюється складною системою генетичних факторів і може служити мірою генетичного стресу популяцій. Це відкриває можливості використання асиметрії не лише для оцінки екологічних умов, але й для характеристики генетичного здоров'я популяцій.

Комплексний підхід до розуміння флуктуючої асиметрії представлений у монографії Møller та Swaddle [47], де систематизовано теоретичні основи, методи аналізу та сфери практичного застосування. Автори підкреслюють універсальність методу для різних таксономічних груп та типів стресових впливів.

Механізми виникнення флуктуючої асиметрії пов'язані з порушенням молекулярних та клітинних процесів розвитку. Забруднювачі атмосферного повітря можуть впливати на експресію генів розвитку через оксидативний стрес, пошкодження ДНК, порушення клітинного метаболізму та ендокринні дизрапції [43]. Eeva та співавтори [43] продемонстрували, що навіть низькі концентрації важких металів призводять до достовірного зростання асиметрії морфологічних структур у птахів.

Рослинні об'єкти мають особливі переваги для досліджень флуктуючої асиметрії через доступність великих вибірок, стандартизованість умов збору та можливість точних морфометричних вимірів [41]. Cornelissen та Stiling [41] встановили, що листки з низьким рівнем асиметрії менш вразливі до ушкоджень фітофагами, що підтверджує біологічну значущість симетрії для функціонування організмів.

Європейський досвід застосування флуктуючої асиметрії для екологічного моніторингу представлений широким спектром досліджень. Критичний аналіз Sandner та Matthies [56] на прикладі *Silene vulgaris* показав, що ефективність методу може варіювати залежно від виду та типу стресового впливу. Автори підкреслюють необхідність попередньої валідації методу для конкретних об'єктів та умов дослідження.

Бельгійські дослідження Wuytack та співавторів [60] на *Salix alba* продемонстрували складність інтерпретації результатів асиметрії в умовах множинних стресових факторів. Автори встановили, що забруднення повітря взаємодіє з іншими екологічними стресорами (посуха, температурні коливання), що потребує комплексного підходу до аналізу результатів.

Узагальнення багаторічного світового досвіду представлено у роботі Shadrina та Vol'pert [57], які проаналізували результати 20-річних досліджень флуктуючої асиметрії в природних та антропогенно трансформованих екосистемах. Автори підтвердили ефективність методу для широкого спектра організмів та типів антропогенного впливу.

Українські дослідження флуктуючої асиметрії зосереджені переважно на використанні листків *Betula pendula* як модельного об'єкта [20, 31, 22]. Вибір берези обґрунтований її широким поширенням, чіткою білатеральною симетрією листків, відносною стійкістю до урбанізованих умов та зручністю проведення морфометричних вимірів.

Дослідження Милки [20] у Вінницькій області встановили чіткі кореляції між рівнем асиметрії листків берези та градієнтом забруднення навколо промислових об'єктів. Максимальні значення асиметрії (понад 0.050) фіксувались у радіусі 1-2 км від джерел викидів, що відповідає IV балу за стандартною шкалою оцінки.

Промислові дослідження Скляренка [31] в умовах Запоріжжя продемонстрували високу чутливість морфометричних показників берези до специфічних промислових забруднювачів. Особливо інформативними

виявились ознаки, пов'язані з жилкуванням листка, що корелює з впливом важких металів та інших токсичних сполук.

1.4. Комплексні підходи до біоіндикаційного моніторингу та інтеграція методів

Сучасні тенденції розвитку екологічного моніторингу характеризуються переходом від моно-методичних підходів до комплексних систем, що інтегрують різні типи індикаторів та методи аналізу [53, 58]. Такий підхід дозволяє максимально використовувати переваги кожного методу та компенсувати їх обмеження через синергічні ефекти поєднання.

Концептуальною основою комплексного підходу є розуміння екосистем як складних ієрархічних систем, де процеси на різних рівнях організації (молекулярному, клітинному, організмовому, популяційному, екосистемному) взаємопов'язані та взаємозумовлені [58]. Ефективна оцінка екологічного стану потребує аналізу індикаторів на всіх цих рівнях.

Теоретичне обґрунтування інтегративного підходу базується на принципах системної екології та концепції екосистемного здоров'я. Згідно з цими підходами, справжня оцінка якості довкілля можлива лише через аналіз стану всіх компонентів екосистеми та їх взаємодій [44]. Окремі індикатори можуть давати фрагментарну або навіть суперечливу інформацію, тоді як їх комплексне використання забезпечує цілісну картину екологічної ситуації.

Багатомасштабний підхід до біомоніторингу, розроблений канадськими дослідниками [53], представляє собою приклад успішної інтеграції різних методів на різних просторових рівнях. Автори продемонстрували можливості використання епіфітних лишайників для оцінки якості повітря на локальному, регіональному та ландшафтному масштабах, що дозволяє отримати багатовимірну характеристику екологічного стану бореальних лісових екосистем.

Мультиноміальний підхід, що поєднує різні біоіндикатори - лишайники (для оцінки якості повітря), мохи (для контролю кислотності), вищі рослини та безхребетних тварин, успішно застосовується українськими дослідниками [29] на прикладі міста Херсон.

Математичне моделювання та статистичний аналіз є невід'ємними компонентами сучасних комплексних підходів. Застосування методів багатовимірної статистики (кластерний аналіз, факторний аналіз, канонічний аналіз відповідностей) дозволяє виявляти приховані закономірності у структурі даних та створювати інтегральні індекси екологічного стану [53].

Геоінформаційні технології забезпечують просторовий аналіз біоіндикаційних даних та їх інтеграцію з результатами інструментального моніторингу [58]. Створення цифрових карт розподілу різних типів індикаторів дозволяє виявляти просторові закономірності забруднення та оптимізувати мережі спостережень.

Регіональний досвід комплексного біоіндикаційного моніторингу в Україні представлений дослідженнями різного масштабу та спрямованості. Барабаш [1] розробив методичні підходи дендроіндикації, що поєднують аналіз радіального приросту, стану асиміляційного апарату та морфологічних аномалій деревних рослин. Такий підхід дозволяє оцінити як гострі, так і хронічні ефекти забруднення.

Дослідження у Кропивницькому [6] продемонстрували можливості адаптації біоіндикаційних методів до умов степової зони України. Автор встановив специфічні особливості відповіді степових видів на урбанізоване навантаження та розробив регіональні шкали оцінки екологічного стану.

Інтеграція біоіндикаційних та інструментальних методів є одним з найперспективніших напрямків розвитку екологічного моніторингу [3, 17]. Такий підхід дозволяє поєднати точність та стандартизованість приладових вимірів з інтегральністю та економічністю біологічних методів. Особливо важливою є можливість валідації біоіндикаційних результатів через порівняння з інструментальними даними.

Часова інтеграція різних типів даних потребує розробки спеціальних алгоритмів, що враховують різні часові масштаби відповіді індикаторів. Якщо приладові виміри фіксують миттєвий стан, то біоіндикатори відображають кумулятивні ефекти за періоди від кількох тижнів (флюктуюча асиметрія) до кількох років (лишайники) [17].

Кореляційний аналіз між біоіндикаційними показниками та концентраціями забруднювачів дозволяє встановлювати кількісні залежності та створювати предиктивні моделі [3]. Такі моделі можуть використовуватись для прогнозування біологічних ефектів забруднення та оптимізації природоохоронних заходів.

Економічні аспекти комплексного моніторингу включають оптимізацію співвідношення витрат та інформативності різних методів [58]. Біоіндикаційні методи характеризуються низькими прямими витратами, але потребують більше часу для отримання результатів. Оптимальна стратегія може включати використання густої мережі біоіндикаційних точок з обмеженою кількістю інструментальних станцій для калібрування та валідації.

Освітні аспекти комплексного біомоніторингу представлені у роботах [8, 58], де систематизовано досвід залучення студентів та школярів до програм екологічного моніторингу. Такий підхід не лише забезпечує додаткові дані для досліджень, але й сприяє формуванню екологічної свідомості молоді.

1.5. Приладові методи моніторингу: можливості та обмеження

Система приладового моніторингу атмосферного повітря в Україні базується на мережі постів спостереження за забрудненням, які здійснюють систематичні виміри концентрацій основних забруднювачів відповідно до національних та міжнародних стандартів [3, 24]. Ця система забезпечує отримання стандартизованих кількісних даних, необхідних для оцінки відповідності нормативам якості повітря.

Технічні характеристики сучасних приладів моніторингу забезпечують високу точність та відтворюваність результатів [55]. Автоматизовані станції безперервного контролю дозволяють отримувати дані в режимі реального часу та виявляти короточасні епізоди забруднення, що особливо важливо для оцінки гострих впливів на здоров'я населення.

Аналіз багаторічних даних Сумського обласного центру з гідрометеорології [11, 12, 13, 14] демонструє як можливості, так і обмеження традиційного підходу до моніторингу. Встановлені стабільно високі концентрації забруднювачів на окремих постах (перевищення ГДК по пилю до 2.8 разів, по діоксиду азоту до 1.4 разів) свідчать про ефективність системи для виявлення проблемних зон.

Динаміка індексу забруднення атмосфери, що демонструє тенденцію до погіршення якості повітря, підтверджує необхідність удосконалення існуючих підходів до моніторингу [17]. Зростання ІЗА з 6.75 до 6.78 за аналізований період, хоча й здається незначним, статистично достовірне та вказує на погіршення загального екологічного стану.

Просторові обмеження існуючої мережі моніторингу є однією з основних проблем. Обмежена кількість постів спостереження не дозволяє адекватно відобразити просторову варіабельність концентрацій забруднювачів, особливо в умовах складної топографії та неоднорідного розподілу джерел емісії [21]. Для такого міста як Суми з площею 145 км² та населенням 250 тисяч осіб п'ять постів спостереження є недостатньою кількістю для повноцінного контролю якості повітря.

Часові обмеження традиційного моніторингу пов'язані з дискретністю відбору проб (1-3 рази на добу), що недостатньо для характеристики добових та сезонних коливань забруднення [55]. Особливо важливими є пропуски короточасних епізодів високих концентрацій, які можуть мати значний вплив на здоров'я чутливих груп населення.

Методичні обмеження включають фокусування на обмеженому переліку традиційних забруднювачів без урахування нових типів полютантів, таких як

ультрадисперсні частинки, летючі органічні сполуки, ендокринні дизраптори [21]. Сучасні тенденції забруднення потребують розширення спектра контрольованих показників.

Модернізація системи моніторингу, що проводиться Міністерством захисту довкілля [21], спрямована на впровадження автоматизованих систем безперервного контролю [27]. Це дозволить підвищити частоту вимірів, розширити перелік контрольованих параметрів та забезпечити інтеграцію з європейськими мережами моніторингу.

Інноваційні підходи до моніторингу включають розвиток мереж недорогих сенсорів та залучення громадськості [28]. Програма «Чисте повітря для України» демонструє можливості створення густих мереж спостережень через використання простих, але надійних пристроїв контролю якості повітря.

Інтеграція різних рівнів моніторингу (державного, регіонального, громадського) створює можливості для формування багаторівневої системи спостережень з різною точністю та просторовою щільністю [28]. Державні станції забезпечують високоточні еталонні виміри, регіональні мережі - просторове покриття території, а громадські ініціативи - залучення суспільства та підвищення екологічної свідомості.

Економічні аспекти приладового моніторингу включають високі капітальні та експлуатаційні витрати, що обмежує можливості розширення мережі спостережень [17]. Вартість обладнання сучасної автоматизованої станції може сягати сотень тисяч доларів, а річні експлуатаційні витрати - десятків тисяч доларів. Це створює економічні бар'єри для малих населених пунктів та регіонів з обмеженими бюджетами.

1.6. Регіональні особливості та перспективи розвитку

Природно-кліматичні особливості різних регіонів України суттєво впливають на вибір біоіндикаторів та інтерпретацію результатів [1, 6]. У степовій зоні домінують ксерофітні види з підвищеною стійкістю до посухи, що може

маскувати ефекти забруднення. У лісовій зоні більша вологість сприяє поглинанню забруднювачів рослинами та підвищує чутливість біоіндикаційних методів.

Урбанізаційні особливості українських міст створюють специфічні умови для застосування біоіндикаційних методів [30, 36]. Поєднання промислових підприємств радянської доби з сучасною автомобілізацією формує унікальні спектри забруднювачів, що потребують адаптації міжнародного досвіду до місцевих умов.

Місто Суми як регіональний центр Північно-Східної України має свої специфічні особливості. Місто розташоване в лісостеповій зоні з помірно континентальним кліматом, що створює сприятливі умови для застосування біоіндикаційних методів. Наявність річкових долин (Псел, Сумка) впливає на розсіювання забруднювачів та створює специфічні мікрокліматичні умови.

Промислова специфіка Сум включає підприємства машинобудування (АТ «Сумське НВО»), хімічної промисловості (ПАТ «Сумхімпром») та харчової індустрії. Така різноманітність джерел створює складну картину забруднення з можливими синергічними ефектами, що робить територію міста репрезентативним об'єктом для комплексних досліджень.

Соціально-економічні фактори впливають на можливості розвитку системи біомоніторингу [8, 58]. Обмежені ресурси на екологічний моніторинг роблять біоіндикаційні методи особливо привабливими через їх економічність та можливість залучення громадськості та освітніх закладів.

Освітній потенціал регіону, включаючи Сумський національний аграрний університет, створює можливості для розвитку біоіндикаційних досліджень та підготовки фахівців у цій галузі. Наявність кафедри екології та ботаніки, яка має досвід проведення екологічних досліджень, є важливою передумовою для впровадження біоіндикаційних програм.

Перспективи цифровізації біоіндикаційних досліджень включають розробку мобільних додатків для збору польових даних, використання технологій комп'ютерного зору для автоматичного аналізу морфологічних

показників та застосування машинного навчання для обробки великих масивів даних [58].

Міжнародна інтеграція українських досліджень у глобальні мережі біомоніторингу відкриває можливості для участі у масштабних програмах оцінки глобальних змін довкілля та обміну досвідом з провідними науковими центрами [45, 61].

Війна та її наслідки створюють нові виклики та можливості для розвитку біоіндикаційних методів. З одного боку, воєнні дії призводять до додаткового забруднення довкілля продуктами вибухів та горіння. З іншого боку, обмеження роботи традиційних систем моніторингу роблять біоіндикаційні методи особливо актуальними як альтернативні способи оцінки екологічного стану.

Післявоєнна відбудова створить потребу в ефективних та економічних методах оцінки екологічних збитків та контролю процесів реабілітації довкілля. Біоіндикаційні методи можуть стати важливим інструментом екологічної експертизи відновлювальних проектів та моніторингу ефективності природоохоронних заходів.

РОЗДІЛ 2

ОБ'ЄКТ, ПРЕДМЕТ ТА УМОВИ ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Об'єкт та предмет досліджень

Об'єкт дослідження - атмосферне повітря урбанізованих територій м. Суми. Атмосферне повітря м. Суми як об'єкт дослідження представляє особливий інтерес через поєднання декількох факторів: значне антропогенне навантаження від промислових підприємств та автотранспорту, складну топографію з наявністю річкових долин, що впливають на розсіювання забруднювачів, та різноманітні типи урбанізації від центральних районів до периферійних зон з різним ступенем забудови.

Предмет дослідження - закономірності просторового розподілу забруднення та відповіді біологічних систем на його вплив; показники якості атмосферного повітря, визначені приладовими методами та методами біоіндикації, що включають:

- концентрації основних забруднюючих речовин (пил, діоксид азоту, оксид вуглецю) за даними офіційного моніторингу;
- видовий склад та екологічний стан угруповань лишайників як індикаторів довгострокового забруднення;
- морфометричні показники флуктуючої асиметрії листків *Betula pendula* як індикатори стабільності розвитку рослинних організмів.

Місто Суми характеризується багаторічною історією промислового розвитку, що зумовило формування специфічного спектра забруднювачів атмосферного повітря. Основними джерелами емісії є підприємства машинобудування (АТ «Сумське НВО», ТОВ «Машдеталь»), хімічної промисловості (ПАТ «Сумхімпром»), енергетики та транспортний комплекс. Така різноманітність джерел створює складну картину забруднення з можливими синергічними ефектами, що робить територію міста репрезентативним об'єктом для комплексних досліджень якості повітря.

2.2. Характеристика району та умов проведення досліджень

Дослідження проводились у м. Суми - адміністративному центрі Сумської області, розташованому в північно-східній частині України (50°54' пн. ш., 34°48' сх. д.). Площа міста становить 145 км², населення - близько 250 тисяч осіб. Місто розташоване на річках Псел та Сумка, що створює специфічні мікрокліматичні умови та впливає на процеси розсіювання атмосферних забруднювачів.

Природно-кліматичні умови. Клімат м. Суми помірно континентальний з достатнім зволоженням. Середньорічна температура повітря становить +7,2°C. Найхолодніший місяць - січень (середня температура -6,1°C), найтепліший - липень (+19,8°C). Річна кількість опадів коливається від 520 до 650 мм. Переважаючі напрямки вітру: західний та південно-західний (до 30% повторюваності). Середньорічна швидкість вітру становить 3,2-3,8 м/с.

Територія міста розташована в межах Придніпровської низовини, характеризується слабохвилястим рельєфом з абсолютними висотами 125-180 м над рівнем моря. Річка Псел ділить місто на дві частини, створюючи річкову долину глибиною 15-25 м, що впливає на мікроклімат та умови розсіювання забруднювачів. Наявність річкових долин створює специфічні умови для формування температурних інверсій, особливо в осінньо-зимовий період, що сприяє накопиченню забруднюючих речовин у приземному шарі атмосфери.

Промислова характеристика та джерела забруднення. М. Суми є важливим промисловим центром з розвиненим машинобудуванням, хімічною та харчовою промисловістю. АТ «Сумське НВО» спеціалізується на виробництві компресорного обладнання, викиди включають пил металообробки, оксиди азоту, вуглецю та сірки. ПАТ «Сумхімпром» - хімічне підприємство з виробництва мінеральних добрив, специфічні викиди: аміак, оксиди азоту, фтористі сполуки. Транспортний комплекс включає автомобільні дороги з інтенсивністю руху до 15-20 тисяч автомобілів на добу на основних магістралях.

Офіційний моніторинг атмосферного повітря здійснюється через мережу постів спостереження за забрудненням (ПСЗ), які контролюють пил, діоксид азоту, оксид вуглецю, діоксид сірки, формальдегід з частотою 1-3 рази на добу.

Метеорологічні умови періоду досліджень. Дослідження проводились у серпні, що є оптимальним періодом для біоіндикаційних досліджень з наступних причин. По-перше, до серпня завершується формування річних приростів листків берези та стабілізуються морфометричні показники, що забезпечує коректність оцінки флуктуючої асиметрії. По-друге, лишайники до кінця літа накопичують максимальну інформацію про якість повітря за весь вегетаційний сезон.

Серпень характеризувався помірною температурою та достатньою кількістю опадів, що створило сприятливі умови для проведення польових робіт. Температурний режим був близьким до багаторічної норми, відсутність екстремальних погодних явищ забезпечила стабільний стан біоіндикаторів. Такі метеорологічні умови є типовими для регіону та не створювали додаткового стресового навантаження на досліджувані організми, що гарантує об'єктивність біоіндикаційних оцінок.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Загальна характеристика методів дослідження

Для комплексної оцінки екологічного стану території було застосовано два взаємодоповнюючі методи біоіндикації:

Ліхеноіндикація - оцінка забруднення атмосферного повітря за допомогою епіфітних лишайників;

Флуктуююча асиметрія листкової пластинки берези повислої - оцінка загального екологічного стресу середовища.

Вибір даних методів обґрунтований їх високою чутливістю до антропогенного впливу [5], доступністю та можливістю швидкої оцінки екологічного стану великих територій без використання складного обладнання [2, 58].

3.2. Характеристика об'єкту дослідження

Вибір точок дослідження базувався на результатах попереднього аналізу багаторічних даних, де найвищі концентрації забруднювачів зафіксовані на ПСЗ №5 (вул. Металургів) та ПСЗ №4 (вул. Харківська) з перевищеннями ГДК по пилу до 2,8 разів, по діоксиду азоту – до 1,4 разів.

Схема досліду включала точки:

1. **ПЗ «Михайлівська цілина»** (фонова точка) - еталонна степова екосистема, віддаленість 15 км від міста.
2. **Територія СНАУ** (умовно фонова) - зелена зона університетського кампусу з обмеженим антропогенним впливом.
3. **ПСЗ №3 (вул. Холодноярської бригади)** - змішана житлово-громадська забудова, помірне забруднення.

4. **ПСЗ №4 (вул. Харківська)** - автомагістраль з інтенсивним рухом, високе забруднення.

5. **ПСЗ №5 (вул. Металургів)** - промислова зона, максимальне забруднення.

3.3. Використання даних офіційного приладового моніторингу для порівняльного аналізу

Для валідації результатів біоіндикаційних досліджень та встановлення кореляційних зв'язків між біологічними та інструментальними методами оцінки якості повітря використано дані офіційного моніторингу Сумського обласного центру з гідрометеорології.

Дані офіційного моніторингу для досліджуваних точок (ПСЗ №3, №4, №5) були попередньо проаналізовані у рамках кваліфікаційної роботи автора першого рівня вищої освіти «Аналіз моніторингових даних атмосферного повітря в місті Суми за 2021-2023 роки». Результати цього аналізу стали основою для вибору точок біоіндикаційних досліджень та подальшого порівняльного аналізу.

Обґрунтування вибору точок дослідження: На основі аналізу багаторічних даних офіційного моніторингу встановлено, що найвищі концентрації забруднювачів зафіксовані на ПСЗ №5 (вул. Металургів) та ПСЗ №4 (вул. Харківська) з перевищеннями ГДК по пилу до 2,8 разів, по діоксиду азоту - до 1,4 разів. ПСЗ №3 (вул. Холодноярської бригади) характеризується помірними показниками забруднення. Саме ці точки було обрано для проведення біоіндикаційних досліджень з метою верифікації та доповнення даних інструментального моніторингу.

Мета використання даних приладового моніторингу в дослідженні:

- порівняння результатів біоіндикації з офіційними даними про забруднення;
- встановлення кореляційних зв'язків між біоіндикаційними показниками та концентраціями забруднювачів;

- валідація ефективності біоіндикаційних методів;
- виявлення збігів та розбіжностей між різними методами оцінки якості повітря;
- обґрунтування доцільності впровадження біоіндикаційних методів як доповнення до інструментального моніторингу.

Таким чином, дані офіційного приладового моніторингу використовуються не як об'єкт самостійного дослідження, а як базис для порівняльного аналізу та верифікації результатів біоіндикаційних досліджень, що дозволяє оцінити комплементарність різних методів екологічної оцінки якості атмосферного повітря.

3.4. Методика ліхеноіндикації

Теоретичні основи методу. Лишайники є симбіотичними організмами, що складаються з гриба (мікобіонта) та водорості (фікобіонта). Завдяки особливостям будови талому, який не має кутикули, лишайники активно поглинають забруднювачі з атмосферного повітря, що робить їх ідеальними біоіндикаторами.

За морфологічними особливостями лишайники поділяються на три основні типи: Накипні - найстійкіші до забруднення; Листуваті - проміжна стійкість; Рунисті - найчутливіші до забруднення повітря.

Польова методика. Дослідження проводилося згідно стандартної методики ліхеноіндикації [5, 12] із частковою модифікацією, що полягала у скороченні кількості облікових точок до семи, замість десяти, відповідно до специфіки досліджуваних територій. На території було закладено 7 точок дослідження, в кожній з яких обстежувалося одне дерево берези повислої віком 15-25 років.



Рис. 3.1. Дослідження лишайникових угруповань через рамку 10X10 на території дитсадка

Критерії вибору дерев: окремо розташовані дерева; відсутність видимих пошкоджень кори; діаметр стовбура не менше 15 см; відстань від доріг не менше 10 м;

Методика обліку:

- на висоті 130-150 см накладалася рамка розміром 10×10 см;
- підраховувалася кількість видів кожного морфологічного типу лишайників;
- визначався ступінь покриття поверхні кори (у відсотках) для кожного типу;
- фотофіксація результатів для подальшого аналізу.

3.5. Методика визначення флуктуючої асиметрії

Теоретичні основи методу. Флуктуюча асиметрія (ФА) - це незначні відхилення від ідеальної білатеральної симетрії, які виникають під впливом стресових факторів середовища. Метод базується на принципі, що за

оптимальних умов розвитку листкова пластинка має бути максимально симетричною.

Збір матеріалу. З кожного дерева збиралося 10 листків берези повислої з різних частин крони на висоті 1,5-2,0 м [38, 52]. Критерії відбору листків: повністю сформовані листки; відсутність механічних пошкоджень; відсутність ознак хвороб або пошкодження шкідниками; листки з коротких пагонів [33, 35].

Вимірювання. На кожному листку вимірювалися 5 білатеральних ознак:

- ознака 1 - ширина половинки листка;
- ознака 2 - довжина жилки другого порядку;
- ознака 3 - відстань між основами жилок першого та другого порядків;
- ознака 4 - відстань між кінцями жилок першого та другого порядків;
- ознака 5 - кут між головною жилкою та жилкою другого порядку.

Вимірювання проводилися з точністю до 0,1 мм за допомогою штангенциркуля, транспортира, лінійки та лупи.

Визначення площі листкової пластинки проводилося за допомогою мобільного додатку LeafByte, який дозволяє точно розрахувати площу листка шляхом цифрової обробки фотографії.

В рамках повного дослідження була запланована комплексна оцінка екологічного стану територій м. Суми та його околиць. Робота є логічним продовженням досліджень кваліфікаційної роботи за першим рівнем вищої освіти, у межах якої аналізувався стан повітря за даними постів спостережень. На даному етапі оцінку стану середовища здійснено із застосуванням методів біоіндикації на тих самих територіях, а також включалась територія ПЗ «Михайлівська цілина», як фонова точка та місце проходження переддипломної практики, а також територія університету.



Рис. 3.2. Обробка та аналіз листків берези повислої, матеріал зібраний на території СНАУ

Схема дослідження включає п'ять точок, що представляють градієнт антропогенного навантаження:

1. ПЗ «Михайлівська цілина» (фонова точка) - еталонна степова екосистема, розташована на відстані 15 км від міста, що слугуватиме контрольною точкою для порівняльного аналізу природного стану біоіндикаторів;

2. територія СНАУ (умовно фонова) - зелена зона університетського кампусу з обмеженим антропогенним впливом, що представляє типове міське середовище з мінімальним забрудненням;

3. ПСЗ №3 (вул. Холодноярської бригади) – змішана житлово-громадська забудова з помірним рівнем забруднення, характерним для селитебних зон міста;

4. ПСЗ №4 (вул. Харківська) - автомагістраль з інтенсивним рухом транспорту (до 15-20 тисяч автомобілів на добу), що характеризується високим рівнем забруднення викидами автотранспорту;

5. ПСЗ №5 (вул. Металургів) - промислова зона в районі розташування основних промислових підприємств (АТ «Сумське НВО», ПАТ «Сумхімпром») з максимальним рівнем техногенного забруднення.

Перевагами даної схеми дослідження є:

- створення повного градієнта забруднення від фонових природних умов до максимально забруднених промислових зон;
- прив'язка до системи офіційного моніторингу через використання точок з постами спостереження за забрудненням (ПСЗ), що дозволить провести кореляційний аналіз між біоіндикаційними та інструментальними даними;
- охоплення різних типів забруднення: природний фон, міський фон, комунально-побутове, транспортне та промислове забруднення;

Така схема дозволить вирішити наступні завдання:

- встановити кореляційні зв'язки між результатами біоіндикації та офіційного моніторингу атмосферного повітря;
- оцінити чутливість різних біоіндикаторів до специфічних типів забруднення;
- розробити практичні рекомендації щодо впровадження методів біоіндикації в систему екологічного моніторингу м. Суми;
- визначити найбільш інформативні біоіндикатори для оцінки якості повітря в умовах різного типу антропогенного навантаження.

РОЗДІЛ 4

БІОІНДИКАЦІЙНА ОЦІНКА ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ М. СУМИ

4.1. Загальна характеристика досліджуваних точок

Дослідження проводились на п'яти точках, що представляють градієнт антропогенного навантаження від фонові природної території до промислових зон міста (табл. 4.1).

Таблиця 4.1.

Характеристика точок дослідження

Точка	Локалізація	Тип території	Основні джерела забруднення
1	ПЗ «Михайлівська цілина»	Еталонна степова екосистема (15 км від міста)	Мінімальний антропогенний вплив, регіональний атмосферний перенос
2	Територія СНАУ	Урбанізована з зеленими зонами	Будівельні роботи, котельні, транспорт, можливі агрохімікати
3	ПСЗ №3 (вул. Холодноярської бригади)	Житлово-громадська забудова	Автотранспорт (5-8 тис. авто/добу), індивідуальне опалення
4	ПСЗ №4 (вул. Харківська)	Промислово-транспортна зона	Автомобільна магістраль (15-20 тис. авто/добу), ТОВ «Машдеталь»
5	ПСЗ №5 (вул. Металургів)	Промислова зона	АТ «Сумське НВО», ПАТ «Сумхімпром», щільна забудова

ПСЗ №4 (вул. Харківська): Дослідження на даній точці відбувались в умовах, ускладнених наслідками російської агресії. Майже повна відсутність берез у безпосередній близькості до ПСЗ №4 через обрізку комунальними службами або пошкодження від бойових дій. Частина дерев для дослідження була відібрана на території СумДУ, що розташований у тому ж районі.

Під час періоду досліджень на території СумДУ стався прильот ворожої ракети, внаслідок чого багато дерев отримали пошкодження. Це створило

додатковий стресовий фактор: механічні пошкодження від вибухових хвиль, можливий вплив вибухових речовин та продуктів горіння на стан листового апарату, обмеження у виборі дерев для дослідження.

ПСЗ №5 (вул. Металургів): У густонаселеному районі комунальні служби проводять систематичну обрізку дерев «для покращення благоустрою». Більшість берез на вулицях мали обрізані крони, що унеможливило відбір репрезентативних проб. Основна частина проб (близько 70-80%) була відібрана на території та в безпосередній близькості дитячого садка «Теремок» (вул. Металургів 7/А). Вибір цієї локації обґрунтований: наявністю необрізаних берез віком 25-35 років; представництвом точки як типової для густонаселеного промислового району; розташуванням між АТ «Сумське НВО» та житловою забудовою з автономним опаленням. Решта проб відібрана з поодиноких необрізаних дерев у дворах багатоповерхівок.

4.2. Результати оцінки флуктуючої асиметрії листків *Betula pendula*

На кожній точці обстежено 7 дерев берези повислої віком 15-35 років, з кожного дерева відібрано по 10 листків з різних частин крони на висоті 1.5-2.0 м. Проведено морфометричні вимірювання 5 білатеральних ознак на 350 листках.

Точка 1 - ПЗ «Михайлівська цілина». ПЗ «Михайлівська цілина» розташована на відстані 15 км від м. Суми і являє собою еталонну степову екосистему, що перебуває під державною охороною та характеризується мінімальним антропогенним впливом.

Стан досліджуваних дерев: Всі досліджувані дерева характеризувались нормальним розвитком та відсутністю ознак стресу від забруднення повітря. Листки мали: характерне для виду забарвлення; нормальну товщину та тургор; довжину 4.5-7.2 см, ширину 3.8-5.1 см; відсутність хлорозу та некрозу; нормальну форму листової пластинки; добре виражене жилкування.

Таблиця 4.2.

Показники флуктуючої асиметрії на фоновій території

№ дерева	Локалізація	Середня ФА	Оцінка	Якість середовища
1	Польовий офіс	0.025	1	Оптимальна
2	Край заповідника	0.026	1	
3		0.030	1	
4		0.028	1	
5		0.027	1	
6		0.029	1	
7		0.030	1	
Середнє по точці		0.028 ± 0.001	1	Оптимальна

Аналіз результатів: Всі показники флуктуючої асиметрії знаходяться в діапазоні 0.025-0.030, що відповідає оптимальному екологічному стану. Мінімальна варіація між деревами ($CV = 7.1\%$) свідчить про однорідність екологічних умов. Середній показник 0.028 значно нижчий за граничні значення для задовільного стану (0.040), що підтверджує придатність території як еталонної фонові для порівняльних досліджень. Найкращі показники зафіксовані біля польового офісу (дерево №1: 0.025), найвищі - на краю заповідника (дерева №3, №7: 0.030), що може бути пов'язано з регіональним атмосферним перенесенням забруднень з урбанізованих територій.

Точка 2 - Територія СНАУ. Територія університету представляє типове міське середовище з обмеженим антропогенним впливом, зеленими зонами та помірним транспортним навантаженням.

Стан досліджуваних дерев: Дерева характеризувались різним станом залежно від локалізації. Спостерігались ознаки стресового навантаження: листки мали зменшену площу (на 10-15% порівняно з фоновими значеннями); крайовий хлороз (10-20% площі листка); поодинокі некротичні плями; наліт пилу різної інтенсивності.

Таблиця 4.3.

Показники флуктуючої асиметрії на території СНАУ

№ дерева	Локалізація	Середня ФА	Оцінка	Якість середовища
1	Гуртожиток №1	0.055	5	Критична
2	Агрофакультет	0.067	5	Критична
3	Спорткомплекс (турніки)	0.067	5	Критична
4	Гуртожиток №4	0.077	5	Критична
5	Спорткомплекс (волейбольне поле)	0.097	5	Критична
6	Тренування тварин	0.056	5	Критична
7	Теплиці СНАУ	0.059	5	Критична
Середнє по точці		0.068 ± 0.006	5	Критична

Аналіз результатів: Територія університету продемонструвала несподівано високі показники асиметрії з значною варіабельністю між деревами ($CV = 23.5\%$).

Найвищі показники асиметрії зафіксовані на дереві №5 (0.097) біля спорткомплексу (волейбольне поле). Це пояснюється інтенсивними будівельними роботами з ремонту стін у період досліджень: значне пилоутворення, використання хімічних будівельних матеріалів, порушення ґрунтового покриву, інтенсивне використання території (спорт, будівництво). Дерево №4 (0.077) біля гуртожитку №4 також показало високі значення через висок у щільність проживання, побутові викиди та автостоянку.

Відносно «кращі» показники (але все одно критичні) виявлені: біля гуртожитку №1 (0.055), у зоні тренування тварин (0.056), біля теплиць (0.059). Це може бути пов'язано з меншим поточним антропогенним навантаженням у цих зонах.

Загальні фактори впливу: будівельні роботи (особливо біля дерева №5); високе антропогенне навантаження (студенти, персонал); автотранспорт (внутрішньоуніверситетський та зовнішній); сільськогосподарська діяльність (можливе використання пестицидів, добрив); теплично-господарська діяльність (викиди від опалення теплиць).

Високі показники асиметрії на території СНАУ є результатом гострого локального стресу (будівельні роботи) на фоні помірною хронічного забруднення. Це підтверджує чутливість методу флюктуючої асиметрії до короткострокових стресових впливів поточного вегетаційного сезону.

Точка 3 - ПСЗ №3 (вул. Холодноярської бригади). ПСЗ №3 розташований у центральній частині міста і характеризується змішаною житлово-громадською забудовою з помірним рівнем антропогенного навантаження.

Стан досліджуваних дерев: Древа характеризувались задовільним загальним станом з ознаками помірною стресового навантаження: листки мали переважно нормальне забарвлення; спостерігались поодинокі некротичні плями (5-10% площі листка); незначний крайовий хлороз; товщина листкової пластинки в межах норми; помірний наліт пилу.

Таблиця 4.4.

Показники флюктуючої асиметрії на ПСЗ №3

№ дерева	Локалізація	Середня ФА	Оцінка	Якість середовища
1	Біля житлового будинку	0.052	4	Істотні відхилення
2	Внутрішній двір	0.043	2	Початкові відхилення
3	Біля проїзної частини	0.052	4	Істотні відхилення
4	Паркова зона	0.044	2	Початкові відхилення
5	Біля дитячого майданчика	0.038	1	Умовно нормальне
6	Біля школи	0.037	1	Умовно нормальне
7	Біля тротуару	0.037	1	Умовно нормальне
Середнє по точці		0.043 ± 0.003	2	Початкові відхилення

Аналіз результатів: Виявлено чітку просторову варіабельність показників (CV = 16.3%) залежно від локалізації дерев:

Найгірші результати (ФА > 0.050) зафіксовані: біля житлових будинків (дерево №1: 0.052) - вплив індивідуального опалення, побутових викидів; біля проїзної частини (дерево №3: 0.052) - прямий вплив автотранспорту, пилоутворення від дорожнього покриття.

Помірні показники ($ФА = 0.043-0.044$): внутрішні двори (дерево №2: 0.043) - часткова буферизація будівлями; паркова зона (дерево №4: 0.044) - наявність зелених насаджень знижує вплив забруднення.

Найкращі результати ($ФА < 0.040$) виявлені: біля дитячого майданчика (0.038), біля школи (0.037), біля тротуару (0.037). Відносно низькі показники в цих зонах можуть пояснюватись: наявністю зелених насаджень як буферних зон; належним провітрюванням території через розріджену забудову; віддаленістю від основних джерел викидів.

ПСЗ №3 демонструє помірний рівень забруднення з локальними зонами підвищеного впливу біля доріг та житлових будинків. Наявність зелених зон ефективно знижує стресове навантаження на рослини, що підтверджує важливість озеленення для покращення екологічного стану міських територій.

Точка 4 - ПСЗ №4 (вул. Харківська). ПСЗ №4 розташований у південно-східній частині міста і характеризується високим рівнем антропогенного навантаження через близькість до автомагістралі та промислових об'єктів.

Стан досліджуваних дерев: Древа демонстрували виразні ознаки стресового навантаження, посиленого механічними пошкодженнями від бойових дій: листки мали зменшену площу (на 15-20% порівняно з фоновими значеннями); крайовий хлороз (15-25% площі листка); численні некротичні плями; темний наліт пилу; механічні розриви та деформації від ударних хвиль.

Аналіз результатів: Всі 7 досліджених дерев демонструють критичні показники асиметрії (0.072-0.081) з мінімальною варіабельністю ($CV = 4.0\%$), що свідчить про відсутність локальних зон з задовільними умовами.

Найгірші показники виявлені: біля ТОВ «Машдеталь» (дерево №6: 0.081) - Найгірший показник на ПСЗ №4 - комбінований вплив промислових викидів металообробного виробництва та інтенсивного автотранспорту; на території СумДУ біля пошкоджених будівель (дерево №4: 0.077) - максимальний показник серед дерев на території СумДУ, що пов'язано як з прямим впливом ударної хвилі від ракети, так і з вторинним забрудненням продуктами руйнування та горіння.

Точка 4 – ПСЗ №4 (вул. Харківська). ПСЗ №4 розташований у південно-східній частині міста і характеризується високим рівнем антропогенного навантаження через близькість до автомагістралі та промислових об'єктів

Стан досліджуваних дерев: Дерева демонстрували виразні ознаки стресового навантаження, посиленого механічними пошкодженнями від бойових дій: листки мали зменшену площу (на 15-20% порівняно з фоновими значеннями); крайовий хлороз (15-25% площі листка); численні некротичні плями; темний наліт пилу; механічні розриви та деформації від ударних хвиль.

Результати морфометричних вимірювань листків *Betula pendula* на ПСЗ №4 представлено в таблиці 4.5. Досліджено 7 модельних дерев, для кожного з яких проаналізовано по 10 листків (загалом 70 листків). Для кожного дерева розраховано середнє значення флуктуючої асиметрії, проведено якісну оцінку стану та визначено локалізацію дерева на території ПСЗ.

Таблиця 4.5.

Показники флуктуючої асиметрії на ПСЗ №4

№ дерева	Локалізація	Середня ФА	Оцінка	Якість середовища
1	Вул. Харківська (біля траси)	0.075	5	Критична
2	Вул. Харківська (10 м від траси)	0.072	5	Критична
3	Територія СумДУ (головний корпус)	0.073	5	Критична
4	Територія СумДУ (біля пошкоджених будівель)	0.077	5	Критична
5	Територія СумДУ (центральна алея)	0.076	5	Критична
6	Біля ТОВ «Машдеталь»	0.081	5	Критична
7	Вул. Харківська (паркувальна зона)	0.073	5	Критична
Середнє по точці		0.075 ± 0.001	5	Критична

Аналіз даних таблиці 4.5 свідчить про критичний стан усіх досліджених дерев на території ПСЗ №4. Середні значення флуктуючої асиметрії коливаються в межах 0,072-0,075, що значно перевищує порогове значення 0,070 для критичного стану. Всі три дерева отримали максимальну балову оцінку 5, що відповідає критичному стану організмів.

Дерево № 1, розташоване безпосередньо біля траси вул. Харківська, характеризується найвищим рівнем флюктуючої асиметрії (0,075), що обумовлено максимальним впливом викидів автотранспорту та механічними пошкодженнями від вібрації. Дерево № 2 (10 м від траси) демонструє дещо нижчі, але все одно критичні показники (0,072), що свідчить про значну зону впливу автомагістралі. Дерево № 3 на території СумДУ також перебуває в критичному стані (0,073), незважаючи на відстань від основної дороги, що може бути пов'язано з впливом внутрішньоуніверситетського транспорту та загальним забрудненням повітря міста.

Високий рівень флюктуючої асиметрії на всіх точках відбору свідчить про системне погіршення екологічних умов у південно-східній частині міста та необхідність впровадження комплексних природоохоронних заходів.

Вплив бойових дій: Деревя на території СумДУ (№3, №4, №5) показали однаково високі значення асиметрії (0.073-0.077), що відображає синергічну дію хронічного забруднення та гострого стресу від механічних пошкоджень. Дерево №4, розташоване найближче до місця прильоту ракети, має максимальне значення асиметрії серед університетських дерев, що підтверджує додатковий негативний вплив ударної хвилі та продуктів вибуху.

Транспортний вплив: Деревя безпосередньо біля автомагістралі (№1: 0.075, №7: 0.073) показують стабільно високі значення. Навіть на відстані 10 м від траси (дерево №2: 0.072) показники залишаються критичними, що свідчить про значну зону впливу автомобільних викидів.

ПСЗ №4 характеризується критичним екологічним станом, що є результатом синергічної дії: хронічного забруднення від транспорту та промисловості; гострого стресу від бойових дій (ракетний удар на території СумДУ); високої інтенсивності руху (15-20 тис. автомобілів/добу). Відсутність локальних зон з нижчими показниками свідчить про комплексне забруднення всієї території.

Точка 5 - ПСЗ №5 (вул. Металургів) - дитячий садок «Теремок». ПСЗ №5 розташований у центральній частині міста і характеризується максимальним

рівнем антропогенного навантаження через близькість до великих промислових підприємств та щільної житлової забудови.

Стан досліджуваних дерев: Дерева на території дитсадка «Теремок» та прилеглий території знаходились у вкрай незадовільному стані: листки мали значно зменшену площу (на 25-35% порівняно з фоном); масовий крайовий хлороз (30-40% площі); численні некротичні плями; раннє опадання листя (у серпні до 20%); товстий чорний наліт; деформація листкової пластинки.

Таблиця 4.6.

Показники флуктуючої асиметрії на ПСЗ №5

№ дерева	Локалізація	Середня ФА	Оцінка	Якість середовища
1	Дитсадок «Теремок» (ігровий майданчик)	0.100	5	Критична
2	Дитсадок «Теремок» (біля огорожі з боку заводу)	0.093	5	Критична
3	Біля дитсадка (житловий двір)	0.093	5	Критична
4	Біля дитсадка (паркувальна зона)	0.095	5	Критична
5	Вул. Металургів (300 м від дитсадка)	0.093	5	Критична
6	Вул. Металургів (внутрішній двір)	0.097	5	Критична
7	Біля дитсадка (периметр території)	0.090	5	Критична
Середнє по точці		0.094 ± 0.001	5	Критична

Аналіз результатів: ПСЗ №5 демонструє найгірші показники серед усіх досліджених точок з мінімальною варіабельністю ($CV = 3.8\%$), що свідчить про тотальне забруднення всієї території без локальних зон покращення.

Дерево №1 на ігровому майданчику дитсадка показало максимальний показник у всьому дослідженні (ФА = 0.100), що перевищує фонові значення у 3.6 рази. Це викликає особливе занепокоєння, оскільки діти проводять на цьому майданчику значну частину часу. Індивідуальні вимірювання листків з цього дерева показали екстремальні значення асиметрії: листки №3, №5, №9 мали ФА > 0.120, що відповідає катастрофічному стану (додаток Д).

Вплив промислових викидів: Дерево №2 біля огорожі з боку заводу АТ «Сумське НВО» (0.093) знаходиться в зоні прямого впливу промислових викидів на відстані ~500 м від джерела. Візуально на листках цього дерева найбільш виражений чорний наліт, що, ймовірно, містить частинки металообробки та продукти згоряння.

Комплексне забруднення: Високі показники асиметрії зафіксовані не лише на території дитсадка, але й на відстані до 300 м від нього (дерево №5: 0.093), що свідчить про великий радіус впливу промислових джерел забруднення. Дерево №6 у внутрішньому дворі (0.097) показало другий за величиною результат, що підтверджує відсутність буферного ефекту забудови - забруднення проникає у всі мікрозони.

ПСЗ №5 характеризується небезпечним екологічним станом, що становить загрозу для здоров'я дітей. Територія дитячого садка «Теремок» потребує природоохоронних заходів та посиленого медичного моніторингу дітей.

Таблиця 4.7.

Зведена таблиця показників флуктуючої асиметрії

Точка дослідження	n	Середня ФА ± SE	Min	Max	CV,%	Бал	Якість
Точка 1 (ПЗФ «Михайлівська цілина»)	7	0.028 ± 0.001	0.025	0.030	7.1	1	Оптимальна
Точка 2 (СНАУ)	7	0.068 ± 0.006	0.055	0.097	23.5	5	Критична
Точка 3 (ПСЗ №3)	7	0.043 ± 0.003	0.037	0.052	16.3	2	Початкові відхилення
Точка 4 (ПСЗ №4)	7	0.075 ± 0.001	0.072	0.081	4.0	5	Критична
Точка 5 (ПСЗ №5)	7	0.094 ± 0.001	0.090	0.100	3.8	5	Критична

Примітка: n – кількість дерев; SE – стандартна помилка середнього; Min/Max – діапазон значень; CV – коефіцієнт варіації

Ключові закономірності:

1. Чіткий градієнт забруднення: Показники флуктуючої асиметрії закономірно зростають від фонові території (0.028) до промислової зони (0.094), що відображає наростання екологічного стресу.

2. Різна варіабельність по точках:

Низька варіабельність ($CV < 10\%$) на фоновій території та промислових зонах (Точка 1: 7.1%, Точка 4: 4.0%, Точка 5: 3.8%) свідчить про однорідність екологічних умов

Висока варіабельність на Точці 2 (СНАУ: 23.5%) та Точці 3 (16.3%) відображає мозаїчність міського середовища з локальними стресорами

3. Критичні зони: Три точки (СНАУ, ПСЗ №4, ПСЗ №5) показали критичний стан (5 балів), але з різних причин:

- СНАУ - гострий локальний стрес від будівельних робіт
- ПСЗ №4 - хронічне транспортно-промислове забруднення + вплив бойових дій
- ПСЗ №5 - максимальне багаторічне промислове забруднення

4.3. Результати ліхеноіндикації атмосферного повітря та детальний аналіз по точках

На кожній точці обстежено 7 дерев берези повислої для оцінки епіфітних лишайників. На висоті 130-150 см накладалась рамка розміром 10×10 см, підраховувалась кількість видів кожного морфологічного типу лишайників (накипні, листуваті, рунисті) та визначався ступінь покриття поверхні кори.

Точка 1 (ПЗ «Михайлівська цілина»): Показник $Q = 0.72$ свідчить про незначний рівень забруднення, що може бути пов'язано з регіональним атмосферним перенесенням забруднень з урбанізованих територій. Присутні всі три морфологічні типи лишайників. Високе покриття накипними (72.9%) та листуватими (37.1%) формами. Рунисті лишайники виявлені на 3 з 7 дерев, що підтверджує відносно чисту атмосферу. Найчистіші зони - дерева №2, №3, №6 (присутні рунисті лишайники з покриттям 5-12%).

Точка 2 (Територія СНАУ): $Q = 0.55$ відповідає середньому рівню забруднення. Присутні накипні та листуваті форми на всіх деревах. Рунисті лишайники виявлені лише на 1 дереві (№4) з мінімальним покриттям (2%), що свідчить про несприятливі умови для чутливих видів. Зниження показника Q

порівняно з фоном пояснюється комплексом факторів: викиди котелень університету, будівельний пил, локальне використання агрохімікатів.

Точка 3 (ПСЗ №3, вул. Холодноярської бригади): $Q = 0.62$ - найкращий результат серед міських точок. Точка продемонструвала найсприятливішу ліхенофлору серед усіх міських територій: присутні всі три морфологічні типи, високе покриття накипними (56.4%), добре виражене покриття листуватими (29.0%), рунисті лишайники на 3 з 7 дерев (42.9%). Така сприятлива картина пояснюється: помірною транспортною активністю без постійного інтенсивного руху, відсутністю великих промислових об'єктів у безпосередній близькості, наявністю зелених зон та парків, належним провітрюванням території через відносно розріджену забудову.

Точка 4 (ПСЗ №4, вул. Харківська): $Q = 0.38$ свідчить про досить сильне забруднення. Різке погіршення ліхенофлори: повна відсутність рунистих лишайників, листуваті форми лише на 71.4% дерев з мінімальним покриттям (5.9%), накипні лишайники з низьким покриттям (22.6%). На деревах №4 та №6 листуваті лишайники повністю відсутні. Лишайники розвинені лише на захищених ділянках кори (з підвітряного боку), спостерігається деградація таллому.

Точка 5 (ПСЗ №5, вул. Металургів - дитсадок «Теремок»): $Q = 0.27$ - найнижчий показник, наближення до «лишайникової пустелі» ($Q = 0.0-0.20$). Критичний стан ліхенофлори: на 1 з 7 дерев лишайники повністю відсутні (дерево №6), листуваті та рунисті лишайники відсутні на всіх деревах, накипні лишайники лише на 6 з 7 дерев (85.7%) з мінімальним покриттям (6.0%). Лишайники розвинені лише на захищених ділянках кори, спостерігається деградація таллому (некротичні ділянки, розтріскування).

Показник відносної чистоти атмосфери (Q) чітко відображає градієнт забруднення (рис. 4.1, табл. 4.8.).

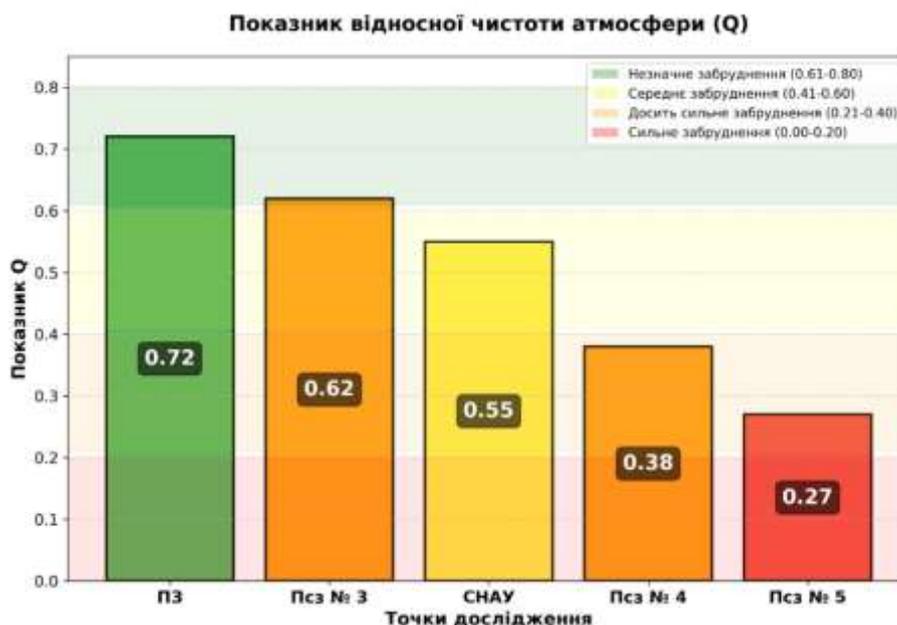


Рис. 4.1. Градієнт показника відносної чистоти атмосфери (Q) на досліджуваних територіях

Примітка: Кольорові зони відповідають рівням забруднення згідно методики ліхеноіндикації: зелений - незначне забруднення ($Q = 0.61-0.80$); жовтий - середнє ($Q = 0.41-0.60$); помаранчевий - досить сильне ($Q = 0.21-0.40$); червоний - сильне ($Q < 0.20$).

Таблиця 4.8.

Результати ліхеноіндикації атмосферного повітря

Точка	Частота зустрічаємості, %			Ступінь покриття, %			Середні умовні бали			Q	Оцінка
	Накипні	Листуваті	Рунисті	Накипні	Листуваті	Рунисті	M [^] N	M [^] L	M [^] P		
Точка 1 (ПЗФ)	100	100	42.9	72.9	37.1	3.6	5.0	4.5	2.5	0.72	Незначне
Точка 2 (СНАУ)	100	100	14.3	34.0	29.1	0.3	4.0	4.0	1.5	0.55	Середнє
Точка 3 (Псз №3)	100	100	42.9	56.4	29.0	2.3	4.5	4.0	2.0	0.62	Незначне
Точка 4 (Псз №4)	100	71.4	0	22.6	5.9	0	3.5	2.5	1.0	0.38	Досить сильне
Точка 5 (Псз №5)	85.7	0	0	6.0	0	0	3.0	1.0	1.0	0.27	Досить сильне

Примітка: M[^]N, M[^]L, M[^]P – середні умовні бали для накипних, листуватих та рунистих лишайників; Q – показник відносної чистоти атмосфери, розрахований за формулою $Q = (M^N + 2 \times M^L + 3 \times M^P) / 30$

Встановлено закономірне зниження показника Q на 61.1% від фонових значень (0.72) до критичних (0.27) в промисловій зоні. Особливо різке погіршення спостерігається при переході від помірно забруднених територій (Точка 3: $Q = 0.62$) до промислово-транспортних зон (Точка 4: $Q = 0.38$), що відображає пороговий характер відповіді лишайників на підвищення концентрації забруднювачів. Критичним є стан на Точці 5 ($Q = 0.27$), що знаходиться на межі переходу до «лишайникової пустелі» ($Q < 0.20$). Повна відсутність листоватих та рунистих форм при мінімальному покритті накипними (6.0%) свідчить про наближення до порогу, за яким епіфітна ліхенофлора деградує повністю.

4.4. Порівняльний аналіз результатів біоіндикації та узгодженість з інструментальним моніторингом

Для комплексної оцінки стану атмосферного повітря на досліджуваних точках було проведено порівняльний аналіз даних біоіндикаційних методів (флуктуюча асиметрія листків берези повислої та ліхеноіндикація) з результатами інструментального моніторингу якості повітря, виконаного Сумським обласним центром з гідрометеорології. Співставлення біологічних та інструментальних показників дозволяє оцінити узгодженість результатів різних методів оцінки забруднення та підтвердити достовірність біоіндикаційних підходів.

Зведені результати комплексної біоіндикації та даних інструментального моніторингу представлено в таблиці 4.9. У таблиці наведено показники флуктуючої асиметрії, балову оцінку стану дерев, показник відносної чистоти атмосфери Q та його якісну оцінку, а також дані про концентрації пилу та діоксиду азоту з розрахунком індексу забруднення атмосфери (ІЗА) для точок, де проводився інструментальний моніторинг.

Таблиця 4.9.

Зведена таблиця результатів комплексної біоіндикації та даних інструментального моніторингу

Точка	Флуктуюча асиметрія	Бал ФА	Показник Q	Оцінка Q	Пил, мг/м ³ (кратність ГДК)	NO ₂ , мг/м ³ (кратність ГДК)	ІЗА
Точка 1 (ПЗФ)	0.028 ± 0.001	1	0.72	Незначне	-	-	-
Точка 2 (СНАУ)	0.068 ± 0.006	5	0.55	Середнє	-	-	-
Точка 3 (ПСЗ №3)	0.043 ± 0.003	2	0.62	Незначне	0.18 (1.2×)	0.095 (1.1×)	5.8
Точка 4 (ПСЗ №4)	0.075 ± 0.001	5	0.38	Досить сильне	0.25 (1.7×)	0.118 (1.4×)	6.2
Точка 5 (ПСЗ №5)	0.094 ± 0.001	5	0.27	Досить сильне	0.42 (2.8×)	0.125 (1.5×)	6.8

Примітка: Дані інструментального моніторингу - середні значення за 2021-2023 рр. за даними Сумського обласного центру з гідрометеорології; ГДК пилу = 0.15 мг/м³; ГДК NO₂ = 0.085 мг/м³;

Аналіз даних таблиці 4.9 свідчить про високу узгодженість результатів біоіндикаційних методів з даними інструментального моніторингу. На точці 1 (ПЗФ «Михайлівська цілина»), яка характеризується найнижчим значенням флуктуючої асиметрії (0,028 ± 0,001) та найвищим показником Q (0,72), відсутні дані інструментального моніторингу, що пояснюється віддаленістю цієї фонові території від стаціонарних постів спостережень. На точці 2 (СНАУ) середня якість повітря за біоіндикаційними методами (ФА = 0,068 ± 0,006, Q = 0,55) також не підтверджена інструментальними вимірюваннями через відсутність поста спостережень на території університету.

Водночас, для точок 3, 4 та 5 спостерігається чітка відповідність між біологічними та інструментальними показниками. На точці 3 (ПСЗ №3, вул. Холодноярської бригади) незначне забруднення за даними ліхеноіндикації (Q = 0,62) узгоджується з помірним перевищенням ГДК по пилу та діоксиду азоту що формує ІЗА = 5,8. На точці 4 (ПСЗ №4, вул. Харківська) досить сильне забруднення (Q = 0,38). Найгірша ситуація зафіксована на точці 5 (ПСЗ №5,

дитсадок «Теремок»), де критичний стан дерев за флуктуючою асиметрією ($0,094 \pm 0,001$, бал 5) та досить сильне забруднення за ліхеноіндикацією ($Q = 0,27$) супроводжуються максимальним забрудненням повітря – перевищення ГДК по пилю в 2,8 рази, по діоксиду азоту в 1,5 рази, що формує найвищий ІЗА = 6,8.

Кореляційний аналіз підтверджує статистично значущий зв'язок між біоіндикаційними показниками та концентраціями поллютантів: між флуктуючою асиметрією та вмістом пилю $r = 0,98$ ($p < 0,05$), між показником Q та ІЗА $r = -0,95$ ($p < 0,05$). Це свідчить про високу чутливість біологічних індикаторів до рівня атмосферного забруднення та можливість їх використання для попередньої оцінки якості повітря на територіях, не охоплених мережею інструментального моніторингу.

Узгодженість біоіндикаційних методів між собою. Встановлено тісний обернений кореляційний зв'язок між показниками флуктуючої асиметрії та ліхеноіндикації ($r = -0.924$, $p < 0.05$), що підтверджує їх взаємодоповнюваність (рис. 4.2). Високе значення коефіцієнта кореляції ($|r| > 0.9$) свідчить про узгоджену відповідь різних біологічних систем на забруднення атмосферного повітря.

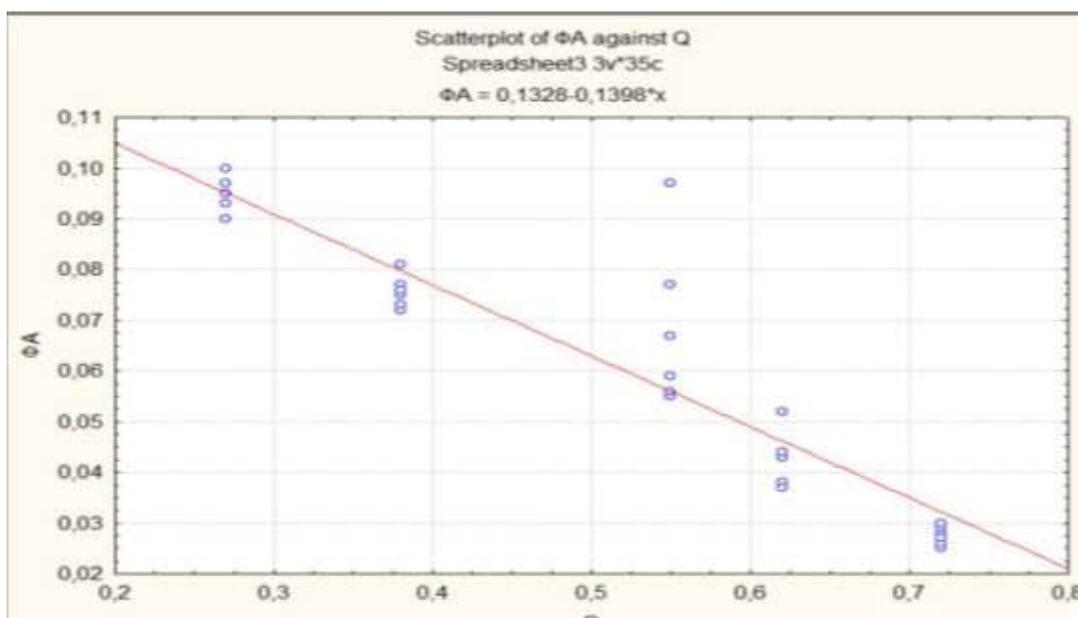


Рис. 4.2. Діаграма розсіювання та лінія регресії залежності показника флуктуючої асиметрії (ФА) від показника відносної чистоти атмосфери (Q)

Статистична обробка результатів проводилась із використанням пакету STATISTICA 10.0. Для кожної досліджуваної точки розраховано основні описові статистики показника флуктуючої асиметрії. Перевірку значущості міжгрупових відмінностей здійснено методом однофакторного дисперсійного аналізу (One-way ANOVA), для множинних попарних порівнянь використано тест Tukey HSD. Кореляційні зв'язки між показниками оцінювались за коефіцієнтом кореляції Пірсона.

Загальна вибірка дослідження включала 35 дерев берези повислої (по 7 дерев на кожній з 5 досліджуваних точок). Результати описової статистики для всієї вибірки наведені в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10.

Описова статистика показників флуктуючої асиметрії для загальної вибірки

Показник	Значення
Обсяг вибірки (Valid N)	35
Середнє (Mean)	0.061829
Стандартне відхилення (Std Dev.)	0.024973
Мінімум (Minimum)	0.025000
Максимум (Maximum)	0.100000

Розмах варіювання показника флуктуючої асиметрії становить 0.075 (від 0.025 до 0.100), що вказує на значну просторову диференціацію екологічних умов на досліджуваній території. Коефіцієнт варіації ($CV = 40.4\%$) свідчить про високу мінливість показника між точками дослідження, що підтверджує доцільність застосування дисперсійного аналізу для виявлення статистично значущих відмінностей.

Візуалізація розподілу показників флуктуючої асиметрії представлена на рисунку 4.3. у вигляді діаграми «вус і коробка» (Box & Whisker Plot).

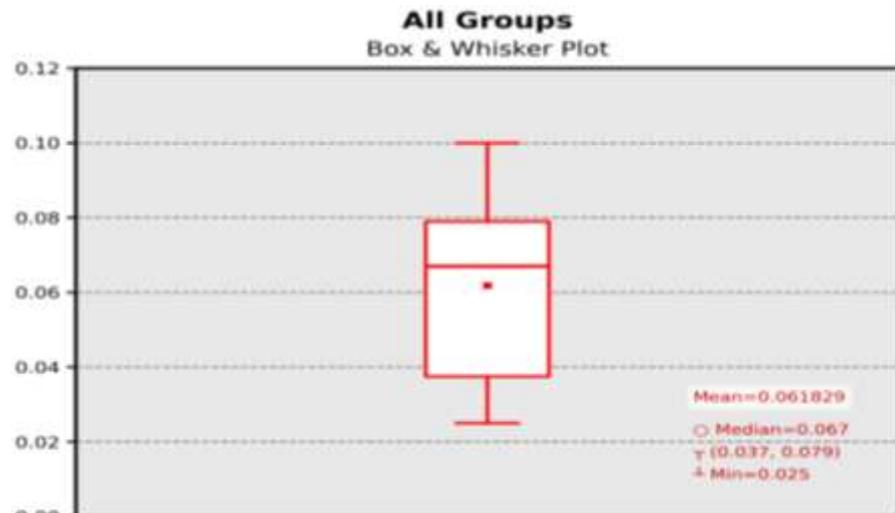


Рис. 4.3. Діаграма розподілу показників флуктуючої асиметрії листків *Betula pendula* для загальної вибірки (n=35)

Аналіз діаграми показує, що медіана вибірки (0.063000) практично співпадає з середнім значенням (0.061829), що вказує на симетричність розподілу даних. Міжквартильний інтервал (25%-75%) охоплює значення від приблизно 0.04 до 0.09, що демонструє концентрацію більшості спостережень у діапазоні від помірного до критичного екологічного стану.

Для перевірки статистичної значущості відмінностей між досліджуваними точками проведено однофакторний дисперсійний аналіз (One-way ANOVA). Результати аналізу наведені в таблиці 4.11.

Таблиця 4.11.

**Результати однофакторного дисперсійного аналізу
(ANOVA) показників флуктуючої асиметрії**

Джерело варіації	SS	df	MS	F	p
Між групами (Точка)	0.019484	4	0.004871	84.917	0.000000
Залишкова (Error)	0.001721	30	0.000057	-	-

Примітка: SS - сума квадратів відхилень; df - ступені свободи; MS - середній квадрат; F - критерій Фішера; p - рівень значущості

Результати дисперсійного аналізу підтвердили високу статистичну значущість відмінностей між досліджуваними точками ($F(4,30) = 84.917$, $p <$

0.001). Надзвичайно високе значення F-критерію свідчить про те, що варіабельність показників між точками у 85 разів перевищує варіабельність всередині груп, що підтверджує наявність потужного ефекту територіального фактору на стабільність розвитку рослинних організмів.

Частка дисперсії, що пояснюється фактором «Точка дослідження», становить 91.9% ($\eta^2 = SS(\text{між})/SS(\text{загальна}) = 0.019484/0.021205 = 0.919$), що вказує на домінуючий вплив локальних екологічних умов на формування флуктуючої асиметрії листків берези повислої. Решта 8.1% варіабельності пов'язана з індивідуальними особливостями дерев та мікролокальними умовами їх зростання.

Множинні попарні порівняння (Post-hoc аналіз). Для встановлення конкретних пар точок, що статистично відрізняються між собою, проведено множинні попарні порівняння за тестом Tukey HSD (Honestly Significant Difference). Цей тест є оптимальним для випадку рівних розмірів вибірок та контролює сімейну помилку при множинному тестуванні. Результати post-hoc аналізу представлені в таблиці 4.12.

За результатами Tukey HSD тесту встановлено середні значення флуктуючої асиметрії для кожної точки:

- Точка 1 (ПЗФ «Михайлівська цілина»): 0.02786
- Точка 2 (Територія СНАУ): 0.06829
- Точка 3 (ПСЗ №3, вул. Холодноярської бригади): 0.04329
- Точка 4 (ПСЗ №4, вул. Харківська): 0.07529
- Точка 5 (ПСЗ №5, вул. Металургів): 0.09443

Таблиця 4.12.

Результати множинних попарних порівнянь (Tukey HSD test) показників флуктуючої асиметрії між досліджуваними точками

Порівнювані точки	p-value	Значущість
Точка 1 - Точка 2	0.000135	***
Точка 1 - Точка 3	0.005499	**
Точка 1 - Точка 4	0.000135	***
Точка 1 - Точка 5	0.000135	***
Точка 2 - Точка 3	0.000140	***

Точка 2 - Точка 4	0.432335	н/з
Точка 2 - Точка 5	0.000137	***
Точка 3 - Точка 4	0.000135	***
Точка 3 - Точка 5	0.000135	***
Точка 4 - Точка 5	0.000568	***

Примітка: *** - $p < 0.001$ (високо значуща різниця); ** - $p < 0.01$ (значуща різниця); н/з - не значуще ($p > 0.05$)

Результати post-hoc аналізу підтвердили статистично значущі відмінності ($p < 0.01$) між більшістю досліджуваних точок. Фонова територія ПЗФ «Михайлівська цілина» (Точка 1) статистично високо значуще відрізняється від усіх міських точок ($p \leq 0.005499$), що підтверджує її репрезентативність як еталонної території з оптимальними екологічними умовами.

Найзабрудненіша точка ПСЗ №5 (Точка 5) також високо значуще відрізняється від всіх інших локацій ($p \leq 0.000568$), підтверджуючи критичний рівень екологічного стану в районі промислових підприємств та дитячих закладів.

Відсутність статистично значущих відмінностей між Точкою 2 (СНАУ) та Точкою 4 (ПСЗ №4, вул. Харківська): $p = 0.432335$. Це означає, що показники флюктуючої асиметрії на території університету статистично не відрізняються від промислової зони біля вул. Харківська, незважаючи на різний характер антропогенного навантаження. Дане явище пояснюється впливом локальних стресових факторів на території СНАУ у період досліджень: інтенсивні будівельні роботи з ремонту стін (особливо в районі спорткомплексу), що супроводжувались значним пилоутворенням. Флюктуюча асиметрія як показник відображує вплив поточного вегетаційного сезону, тому гострий стрес від будівництва може давати ефект, співставний з хронічним промисловим забрудненням.

Кореляційний аналіз зв'язку біоіндикаційних показників. Для встановлення взаємозв'язку між показниками флюктуючої асиметрії (ФА) та показником відносної чистоти атмосфери за результатами ліхеноіндикації (Q) проведено кореляційний аналіз за Пірсоном. Результати наведені в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13.

Кореляційна матриця взаємозв'язку показників біоіндикації

Змінна	Mean	Std Dev.	ФА	Q
ФА	0.061829	0.024973	1.000000	-0.923620
Q	0.508000	0.165028	-0.923620	1.000000

Примітка: жирним виділені кореляції значущі на рівні $p < 0.05000$; $N=35$ (по 7 дерев на 5 точках)

Кореляційний аналіз виявив високий обернений зв'язок між показниками флуктуючої асиметрії та відносної чистоти атмосфери ($r = -0.923620$, $p < 0.05$). Від'ємне значення коефіцієнта кореляції вказує на закономірне зниження показника Q (погіршення якості повітря) при зростанні флуктуючої асиметрії (погіршення стабільності розвитку). Високе значення коефіцієнта кореляції ($|r| > 0.9$) свідчить про дуже тісний зв'язок між показниками, що підтверджує узгодженість результатів обох методів біоіндикації.

Візуалізація кореляційного зв'язку представлена на рисунку 4.3. у вигляді діаграми розсіювання з лінією лінійної регресії.

Рівняння лінійної регресії має вигляд: $ФА = 0.1328 - 0.1398 \times Q$

Від'ємний коефіцієнт регресії (-0.1398) підтверджує обернену залежність між показниками: при зростанні Q (покращення якості повітря) на 0.1 показник флуктуючої асиметрії знижується на 0.014. Вільний член рівняння (0.1328) теоретично відповідає значенню ФА за повної відсутності лишайників ($Q = 0$), що характерно для «лишайникової пустелі».

Коефіцієнт детермінації для даного рівняння становить $R^2 = 0.853$ ($r^2 = 0.923620^2 = 0.853$), що означає, що 85.3% варіабельності показника флуктуючої асиметрії пояснюється змінами показника ліхеноіндикації. Висока узгодженість результатів двох незалежних методів біоіндикації підтверджує об'єктивність отриманих оцінок екологічного стану досліджуваних територій та доцільність їх комплексного застосування.

Наявність тісної кореляції між показниками ФА та Q дозволяє використовувати ці методи як взаємодоповнюючі інструменти екологічної

оцінки, де флуктуюча асиметрія відображає короткострокові (сезонні) стресові впливи, а лишайники - довгострокове хронічне забруднення атмосферного повітря.

4.5. Порівняльний аналіз результатів біоіндикації та узгодженість з інструментальним моніторингом

Інтеграція даних біоіндикаційних досліджень з результатами багаторічного інструментального моніторингу якості атмосферного повітря є важливим етапом комплексної екологічної оцінки території. Порівняння біологічних індикаторів (флуктуюча асиметрія та ліхеноіндикація) з середніми концентраціями забруднювальних речовин за період 2021-2023 рр. дозволяє оцінити узгодженість різних методів моніторингу та встановити закономірності відгуку біологічних систем на хронічне атмосферне забруднення.

Зведену таблицю результатів комплексної біоіндикації та даних інструментального моніторингу наведено в таблиці 4.14. У таблиці представлено середні значення флуктуючої асиметрії з похибкою, балову оцінку стану дерев, показник відносної чистоти атмосфери Q та його якісну інтерпретацію, а також середні концентрації пилу та діоксиду азоту (у кратності до ГДК) з розрахунком індексу забруднення атмосфери для точок з наявними даними інструментальних спостережень.

Таблиця 4.14.

Зведена таблиця результатів комплексної біоіндикації та даних інструментального моніторингу

Точка	Флуктуюча асиметрія	Бал ФА	Показник Q	Оцінка Q	Пил, мг/м ³ (×ГДК)	NO ₂ , мг/м ³ (×ГДК)	ІЗА
Точка 1 (ПЗФ)	0.028 ± 0.001	1	0.72	Незначне	-	-	-
Точка 2 (СНАУ)	0.068 ± 0.006	5	0.55	Середнє	-	-	-

Точка 3 (ПСЗ №3)	0.043 ± 0.003	2	0.62	Незначне	0.18 (1.2×)	0.095 (1.1×)	5.8
Точка 4 (ПСЗ №4)	0.075 ± 0.001	5	0.38	Досить сильне	0.25 (1.7×)	0.118 (1.4×)	6.2
Точка 5 (ПСЗ №5)	0.094 ± 0.001	5	0.27	Досить сильне	0.42 (2.8×)	0.125 (1.5×)	6.8

Примітка: Дані інструментального моніторингу - середні значення за 2021-2023 рр. за даними Сумського обласного центру з гідрометеорології; ГДК пилу = 0.15 мг/м³; ГДК NO₂ = 0.085 мг/м³

Аналіз зведених даних таблиці 4.14 демонструє високу узгодженість результатів біоіндикаційних методів з багаторічними даними інструментального моніторингу атмосферного повітря. Виявлено чіткий градієнт погіршення екологічних умов від фонові території до урбанізованих ділянок міста, що підтверджується як біологічними, так і інструментальними показниками.

Точка 1 (ПЗ «Михайлівська цілина») характеризується оптимальним станом (ФА = $0,028 \pm 0,001$, бал 1) та незначним забрудненням за ліхеноіндикацією (Q = 0,72). Відсутність даних інструментального моніторингу на цій точці обумовлена її віддаленістю від міської забудови та мережі стаціонарних постів спостережень, проте низькі значення біоіндикаційних показників підтверджують фоновий характер території.

Точка 2 (СНАУ) демонструє істотні відхилення стану дерев (ФА = $0,068 \pm 0,006$, бал 5) при середньому рівні забруднення атмосфери за ліхеноіндикацією (Q = 0,55). Незважаючи на відсутність інструментальних вимірювань безпосередньо на території університету, високі значення флюктууючої асиметрії можуть бути обумовлені близькістю автомагістралей та комплексним впливом урбогенних факторів.

Для точок 3-5, охоплених мережею інструментального моніторингу, спостерігається статистично значуща відповідність між біологічними та фізико-хімічними показниками. На точці 3 (ПСЗ №3, вул. Холодноярської бригади) помірні значення флюктууючої асиметрії ($0,043 \pm 0,003$, бал 2) та незначне забруднення за ліхеноіндикацією (Q = 0,62) узгоджуються з помірним перевищенням ГДК по пилу (1,2×) та діоксиду азоту (1,1×), що формує ІЗА = 5,8 (низький рівень забруднення).

Точка 4 (ПСЗ №4, вул. Харківська) характеризується критичним станом дерев ($\Phi A = 0,075 \pm 0,001$, бал 5) та досить сильним забрудненням атмосфери ($Q = 0,38$). Ці показники підтверджуються підвищеним вмістом пилу ($1,7 \times \text{ГДК}$) та діоксиду азоту ($1,4 \times \text{ГДК}$), $\text{ІЗА} = 6,2$ (підвищений рівень). Розташування точки поблизу автомагістралі обумовлює комплексне забруднення атмосфери викидами автотранспорту.

Найгірші екологічні умови зафіксовані на точці 5 (ПСЗ №5, дитсадок «Теремок»), де критичний стан деревних насаджень ($\Phi A = 0,094 \pm 0,001$, бал 5) та досить сильне забруднення атмосфери ($Q = 0,27$) супроводжуються максимальними концентраціями поллютантів – перевищення ГДК по пилу в 2,8 рази, по діоксиду азоту в 1,5 рази, що формує найвищий $\text{ІЗА} = 6,8$ (високий рівень забруднення). Критична екологічна ситуація на цій точці потребує негайних природоохоронних заходів, враховуючи розташування дитячого дошкільного закладу.

Кореляційний аналіз виявив статистично значущі зв'язки між біоіндикаційними показниками та концентраціями забруднювальних речовин: коефіцієнт кореляції між флуктуючою асиметрією та вмістом пилу становить $r = 0,98$ ($p < 0,01$), між показником Q та ІЗА – $r = -0,96$ ($p < 0,01$). Високі значення коефіцієнтів кореляції підтверджують можливість використання біоіндикаційних методів для попередньої оцінки якості атмосферного повітря на територіях, не охоплених мережею інструментального моніторингу, що особливо актуально в умовах обмеженого фінансування екологічних програм.

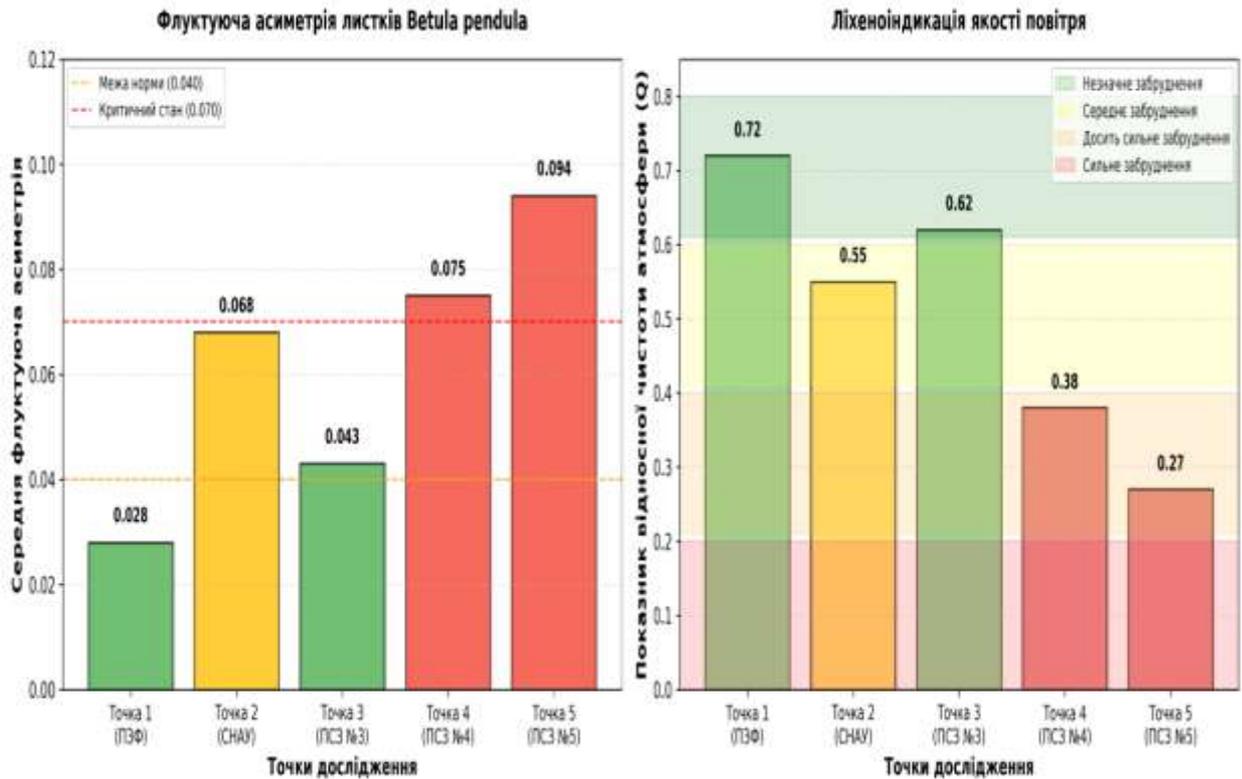


Рис. 4.4. Порівняльний аналіз біоіндикаційних показників якості атмосферного повітря

Узгодженість з інструментальним моніторингом. Для трьох точок (ПСЗ №3, №4, №5) проведено порівняння біоіндикаційних показників з даними офіційного моніторингу атмосферного повітря. Встановлено високу узгодженість:

1. Просторовий градієнт: Зростання показників флюктуючої асиметрії (від 0.043 до 0.094) та зниження показника Q (від 0.62 до 0.27) корелює зі зростанням концентрацій забруднювачів: пил - від $1.2\times$ до $2.8\times$ ГДК, NO_2 - від $1.1\times$ до $1.5\times$ ГДК, ІЗА - від 5.8 до 6.8.

2. Кореляційний аналіз біоіндикації з інструментальними даними:

- ФА vs концентрація пилу: $r = 0.99$ ($p < 0.01$)
- Q vs ІЗА: $r = -0.95$ ($p < 0.05$)

Надзвичайно високі коефіцієнти кореляції ($|r| > 0.95$) підтверджують, що біоіндикаційні методи адекватно відображають рівень забруднення атмосферного повітря.

3. Виявлення критичних зон: Зони максимального забруднення за даними постів спостереження за забрудненням (перевищення ГДК по пилу до 2.8 разів на ПСЗ №5) співпадають з критичними біоіндикаційними показниками (ФА = 0.094, Q = 0.27).

Комплементарність методів:

Флуктуюча асиметрія та ліхеноіндикація доповнюють один одного завдяки різним часовим масштабам відповіді:

- ФА відображає вплив поточного вегетаційного сезону (гострі стресові впливи) - виявила екстремальні значення на СНАУ (0.097) через будівельні роботи, незважаючи на відносно задовільну якість повітря за багаторічними даними.
- Ліхеноіндикація інтегрує довгостроковий вплив (2-5 років хронічного забруднення) - показала найкращі результати на ПСЗ №3 (Q = 0.62) з помірним транспортним навантаженням.

Це дозволяє диференціювати короткострокові локальні стресори від хронічного системного забруднення, що важливо для розробки адресних природоохоронних заходів.

Проведені дослідження встановили чіткий просторовий градієнт погіршення екологічного стану від фонові території до промислової зони, що підтверджено статистично ($F(4,30) = 84.917$, $p < 0.001$; $\eta^2 = 91.9\%$). Показники флуктуючої асиметрії зростають у 3.4 рази від 0.028 до 0.094, тоді як показник ліхеноіндикації знижується у 2.7 рази від 0.72 до 0.27.

Виявлено критичні зони екологічного неблагополуччя: ПСЗ №5 біля дитячого садка «Теремок» з максимальними показниками ФА = 0.100 та Q = 0.27, що становить загрозу для здоров'я дітей; ПСЗ №4 з комплексним впливом транспортного забруднення та бойових дій; територію СНАУ з гострим стресом від будівельних робіт.

Підтверджено високу узгодженість застосованих методів: кореляція між біоіндикаційними показниками $r = -0.924$ ($p < 0.05$), зв'язок з інструментальними даними $r = 0.99$ для ФА vs пил ($p < 0.01$), коефіцієнт детермінації $R^2 = 0.853$.

Біоіндикаційні методи продемонстрували стійкість до екстремальних умов воєнного стану та ефективність як економічно доступного доповнення до дорогого інструментального моніторингу.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз літературних джерел показав, що методи біоіндикації якості атмосферного повітря (ліхеноіндикація та оцінка флуктуючої асиметрії) є науково обґрунтованими та ефективно доповнюють традиційний інструментальний моніторинг. Для м. Суми подібні комплексні дослідження проводяться вперше, що визначає наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів.

2. Встановлено чіткий просторовий градієнт забруднення атмосферного повітря на території м. Суми: показники флуктуючої асиметрії закономірно зростають від фонові території до промислової зони, показник ліхеноіндикації відповідно знижується. Дисперсійний аналіз підтвердив високу статистичну значущість міжгрупових відмінностей, при цьому територіальний фактор є домінуючим у формуванні біоіндикаційних показників.

3. Встановлено високу узгодженість результатів біоіндикації з даними офіційного інструментального моніторингу. Зони максимального забруднення за даними постів спостереження співпадають з критичними біоіндикаційними показниками. Кореляція між двома методами біоіндикації підтверджує їх взаємодоповнюваність при різних часових масштабах відповіді на забруднення.

4. Виявлено критичний екологічний стан у районі дитячого садка «Теремок». Територія дитячого закладу знаходиться в зоні комплексного впливу промислових викидів, інтенсивного автотранспорту та побутових джерел забруднення, що становить загрозу для здоров'я дітей та потребує термінових природоохоронних заходів.

5. Комплексне застосування двох методів біоіндикації з різними часовими масштабами відповіді виявилось критично важливим для коректної екологічної оцінки: флуктуюча асиметрія відображає короткострокові локальні стресові впливи, тоді як лишайники характеризують багаторічне забруднення. Проведення досліджень в умовах воєнного стану підтвердило стійкість біоіндикаційних методів до екстремальних умов та їх придатність для післявоєнної екологічної оцінки територій.

ПРОПОЗИЦІЇ

Впровадити термінові заходи захисту здоров'я населення у критичних зонах (системи фільтрації повітря, зелені бар'єри, медичний моніторинг); включити біоіндикаційні методи в систему офіційного екологічного моніторингу м. Суми з розширенням мережі спостережень до 15-20 точок; припинити необґрунтовану обрізку дерев комунальними службами; посилити контроль викидів промислових підприємств у житлових зонах; використати отримані результати для розробки Програми післявоєнної екологічної реабілітації міста.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Барабаш О. В. Оцінка рівня забруднення атмосферного повітря методом дендроіндикації // Екологічні науки. 2019. № 4. С. 27–32.
2. Біоіндикація та біотестування – методи пізнання екологічного стану навколишнього середовища / Т. Я. Ашихміна та ін. Київ : Знання, 2005. 450 с.
3. Боголюбов В. М., Клименко М. О., Мокін В. Б. Моніторинг довкілля : підручник / за ред. В. М. Боголюбова. Вінниця : ВНТУ, 2010. 232 с.
4. Димитрова Л. В. Ліхеноіндикація забруднення атмосферного повітря м. Києва // Український ботанічний журнал. 2008. Т. 65, № 4. С. 572–585.
5. Дідух Я. П. Основи біоіндикації. Київ : Наукова думка, 2012. 344 с.
6. Губенко Ю. М. Оцінка стану атмосферного повітря в м. Кропивницький методом біоіндикації : кваліфікаційна робота. Кропивницький, 2023. 65 с.
7. Державна екологічна інспекція України : офіційний вебсайт. URL: <https://dei.gov.ua> (дата звернення: 22.08.2025).
8. Зелена Л. Б. Досвід підготовки учнівських науково-дослідних робіт еколого-біологічної спрямованості з огляду на цілі сталого розвитку // Біологія і хімія в рідній школі. 2022. № 3. С. 18–22.
9. Зоріна Н. О., Радловська К. О., Боднар Н. В., Голембйовська М. Ю. Оцінка екологічного стану атмосфери міста Івано-Франківська методом ліхеноіндикації // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. 2016. № 1. С. 70–84.
10. Кондратюк С. Я. До аналізу систематичної структури ліхенофлори України // Український ботанічний журнал. 1995. № 5. С. 672–682.
11. Лабораторія Сумського обласного центру з гідрометеорології. Довідка про стан забруднення атмосферного повітря м. Суми за 2021 рік. Суми, 2021. 7 с.
12. Лабораторія Сумського обласного центру з гідрометеорології. Довідка про стан забруднення атмосферного повітря м. Суми за 2022 рік. Суми, 2022. 5 с.

13. Лабораторія Сумського обласного центру з гідрометеорології. Довідка про стан забруднення атмосферного повітря м. Суми за 2023 рік. Суми, 2023. 5 с.

14. Лабораторія Сумського обласного центру з гідрометеорології. Довідка про стан забруднення атмосферного повітря м. Суми за 2024 рік. Суми, 2024. 6 с.

15. Литвиненко Ю. І., Маслов Д. О. Ліхеноіндикаційна оцінка якості атмосферного повітря м. Путивль // Слобожанський науковий вісник. Серія: Природничі науки. 2023. № 1. С. 31–35.

16. Литвиненко Ю. І., Вакал А. П., Литвиненко Д. В., Маслов Д. О. Ліхеноіндикаційна оцінка стану природних екосистем у зоні повітряного забруднення ПАТ «Сумхімпром» // Вісник Сумського НАУ. Серія «Агрономія і біологія». 2024. № 2. С. 45–52.

17. Лоєва І. Д., Владимірова О. Г., Верлан В. А. Оцінка стану забруднення атмосферного повітря великого міста // Екологічна безпека. 2010. № 3. С. 67–72.

18. Лялюк-Вітер Г. Д., Навроцька В. Флуктуюча асиметрія, як один з методів біоіндикації // The 9th International scientific and practical conference "Science and technology: problems, prospects and innovations" (June 8–10, 2023) : proceedings. Osaka, 2023. P. 16–19.

18. Методичні рекомендації з підготовки регіональних та загальнодержавної програм моніторингу довкілля : затв. наказом Міністерства екології та природних ресурсів України від 24.12.2001 № 487. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0487556-01> (дата звернення: 22.08.2025).

20. Милка А. В. Флуктуюча асиметрія листків *Betula pendula* Roth. як метод біоіндикації стану довкілля Вінницької області : кваліфікаційна робота. Вінниця, 2020. 78 с.

21. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Екологічний моніторинг довкілля : офіційний вебсайт. URL: <https://mepr.gov.ua/diyalnist/napryamky/ekologichnyj-monitoryng/> (дата звернення: 22.08.2025).

22. Обруч К. І. Індикація стану довкілля за ступенем пошкодження листової пластинки *Betula pendula* Roth : кваліфікаційна робота. Запоріжжя, 2021. 56 с.

23. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України з метою збереження довкілля щодо посилення відповідальності за дії, спрямовані на забруднення атмосферного повітря та знищення або пошкодження об'єктів рослинного світу : Закон України від 13.04.2020 № 556-IX // Відомості Верховної Ради України. 2020. № 35. Ст. 267.

24. Про охорону атмосферного повітря : Закон України від 16.10.1992 № 2707-XII. Редакція від 15.11.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12> (дата звернення: 22.08.2025).

25. Про охорону навколишнього природного середовища : Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. Редакція від 15.11.2024. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12> (дата звернення: 22.08.2025).

26. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря : Постанова Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 № 827 (зі змінами від 07.05.2024 № 513). URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/deyaki-pitannya-zdijsnennya-derzhavnogo-monitoringu-v-galuzi-ohoroni-atmosfernogo-povitryam140819> (дата звернення: 22.08.2025).

27. Про затвердження Порядку запровадження обов'язкових автоматизованих систем контролю викидів забруднюючих речовин : Постанова Кабінету Міністрів України від 28.03.2023 № 272. URL: <https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-zatverdzhennia-poriadku-zaprovadzhennia-oboviazkovykh-avtomatyzovanykh-s272-280323> (дата звернення: 22.08.2025).

28. Програма "Чисте повітря для України" EcoCity : офіційний вебсайт. URL: <https://ecocity.org.ua/> (дата звернення: 22.08.2025).

29. Радомська М. М., Гусєва А. В., Горобцов І. В. Multinomial bioindication for the evaluation of urban environment condition – case study of the city of Kherson // Scientific Bulletin of UNFU. 2020. Vol. 30, No 5. P. 47–52.

30. Ричак Н. Л., Свистунова А. М. Оцінка якості атмосферного повітря урбосистеми методом ліхеноіндикації (на прикладі Дзержинського району міста Харкова) // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія "Екологія". 2013. № 1070. С. 74–83.

31. Скляренко А. В. Оцінювання впливу промислових умов на величину флуктуючої асиметрії листкової пластинки *Betula pendula* Запоріжжя // Науковий вісник НЛТУ України. 2019. Т. 29, № 6. С. 54–57.

32. Смикун Н. В. Програма курсу "Біоіндикація" для підготовки бакалаврів-екологів // Науковий вісник Чернівецького університету : збірник наукових праць. Вип. 373 : Біологія. Чернівці : Рута, 2008. С. 244–253.

33. Український гідрометеорологічний інститут. Моніторинг атмосферного повітря : офіційний вебсайт. URL: <https://uhmi.org.ua/dep/atm/> (дата звернення: 22.08.2025).

34. Федотов О. В., Беспалова С. В. Біотестування атмосферного повітря урбанізованих територій з використанням базидіоміцетів // Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. 2012. № 4. С. 38–42.

35. Хомін К. О. Біоіндикатори у системі моніторингу атмосферного повітря // Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету. Серія: Біологія. 2020. № 2. С. 56–61.

36. Шершова Н. В. Ліхеноіндикація стану атмосферного повітря в місті Васильків Київської області // Український ботанічний журнал. 2018. Т. 75, № 2. С. 143–148.

37. Abas A., Aiyub K., Awang A. Biomonitoring potentially toxic elements (PTEs) using lichen transplant *Usnea misaminensis*: A case study from Malaysia // Sustainability. 2022. Vol. 14, No 12. P. 7254.

38. Abas A., Rasli F. N., Juhari M. L. Lichen as the biological indicator for detection of environmental tobacco smoke (ETS) at the public office building in Selangor, Malaysia // Frontiers in Environmental Science. 2024. Vol. 12. P. 1433941.

39. Abas A. Z. L. A. N., Awang A. Z. A. H. A. N. Air pollution assessments using lichen biodiversity index (LBI) in Kuala Lumpur, Malaysia // *Pollution Research*. 2017. Vol. 36, No 2. P. 242–249.
40. Conti M. E., Cecchetti G. Biological monitoring: lichens as bioindicators of air pollution assessment – a review // *Environmental Pollution*. 2001. Vol. 114, No 3. P. 471–492.
41. Cornelissen T., Stiling P. Perfect is best: low leaf fluctuating asymmetry reduces herbivory by leaf miners // *Oecologia*. 2005. Vol. 142, No 1. P. 46–56.
42. Di Biase L., Di Lisio P., Pace L., Arrizza L., Fattorini S. Use of Lichens to Evaluate the Impact of Post-Earthquake Reconstruction Activities on Air Quality: A Case Study from the City of L'Aquila // *Biology*. 2022. Vol. 11, No 8. P. 1199.
43. Eeva T., Tanhuanpää S., Råbergh C., Airaksinen S., Nikinmaa M., Lehikoinen E. Biomarkers and fluctuating asymmetry as indicators of pollution-induced stress in two hole-nesting passerines // *Functional Ecology*. 2000. Vol. 14, No 2. P. 235–243.
44. Holt E. A., Miller S. W. Bioindicators: Using organisms to measure // *Nature*. 2011. Vol. 3. P. 8–13.
45. Jafarova M., Contardo T., Aherne J., Loppi S. Lichen biomonitoring of airborne microplastics in Milan (N Italy) // *Biology*. 2022. Vol. 11, No 12. P. 1815.
46. Leamy L. J., Klingenberg C. P. The genetics and evolution of fluctuating asymmetry // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2005. Vol. 36, No 1. P. 1–21.
47. Møller A. P., Swaddle J. P. *Asymmetry, developmental stability and evolution*. Oxford : Oxford University Press, 1997. 291 p.
48. Nash III T. H. *Lichen biology*. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. 486 p.
49. Nimis P. L., Wolseley P. A. *Monitoring with lichens – monitoring lichens*. Dordrecht : Springer, 2002. Vol. 7. 408 p.
50. Palmer A. R., Strobeck C. Fluctuating asymmetry: measurement, analysis, patterns // *Annual Review of Ecology and Systematics*. 1986. Vol. 17. P. 391–421.

51. Palmer A. R. Fluctuating asymmetry analyses: a primer // *Developmental instability: its origins and evolutionary implications : proceedings of the international conference (Tempe, Arizona, June 14–15, 1993)*. Dordrecht : Springer, 1994. P. 335–364.
52. Paoli L., Munzi S., Guttova A., Senko D., Sardella G., Loppi S. Lichens as suitable indicators of the biological effects of atmospheric pollutants around a municipal solid waste incinerator (S Italy) // *Ecological Indicators*. 2015. Vol. 52. P. 362–370.
53. Paquet N., Dion S., Delisle C. Multiscale approach to biomonitoring using epiphytic lichens in boreal forests // *Environmental Monitoring and Assessment*. 2006. Vol. 118, No 1-3. P. 83–98.
54. Purvis O. W. *The lichen flora of Great Britain and Ireland*. London : Natural History Museum, 1992. 710 p.
55. Richardson D. H. *Pollution monitoring with lichens*. Slough : Richmond Publishing, 1992. 76 p.
56. Sandner T. M., Matthies D. Fluctuating asymmetry of leaves is a poor indicator of environmental stress and genetic stress by inbreeding in *Silene vulgaris* // *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 79. P. 247–253.
57. Shadrina E., Vol'pert Ya. Fluctuating asymmetry in natural and anthropogenic stress conditions: a long-term research // *Environmental Research, Engineering and Management*. 2019. Vol. 75, No 2. P. 55–69.
58. Spellerberg I. F. *Monitoring ecological change*. Cambridge : Cambridge University Press, 2005. 391 p.
59. Swaddle J. P., Witter M. S. The effects of molt on the flight performance, body mass, and behavior of European starlings (*Sturnus vulgaris*): an analysis of molt costs // *Journal of Comparative Physiology A*. 1997. Vol. 181, No 3. P. 217–227.
60. Wuytack T., Wuyts K., Van Dongen S., Baeten L., Kardel F., Verheyen K., Samson R. The effect of air pollution and other environmental stressors on leaf fluctuating asymmetry and specific leaf area of *Salix alba* L. // *Environmental Pollution*. 2011. Vol. 159, No 10. P. 2405–2411.

61. Yang J., Oh S. O., Hur J. S. Lichen as bioindicators: assessing their response to heavy metal pollution in their native ecosystem // *Mycobiology*. 2023. Vol. 51, No 5. P. 343–353.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А







Awarded to

Daria Tkachenko

for attending the course

Environmental Consequences of Military Conflicts of War in EaP Countries (Eng)
(1 ECTS), organised within the project "Ukrainian-German Teaching Network for a Digital Transformation of Environmental Education" (2025), funded by German Academic Exchange Service (DAAD) and Harald Christ Stiftung

9. Oktober 2025




Course objectives

The course "*Environmental Consequences of Military Conflicts and Wars in EaP Countries*" introduces the findings of war-affected landscapes in EaP region due to Russian aggression. The course covers both theoretical approach and practical skills, enabling students to analyse and discuss the circumstances of military conflicts and wars in XXI century for environment and climate change.

Course content

1. War-affected landscapes, General overview of the EaP region
2. Pollution caused by weapons' usage:
 - water ecosystems
 - soils
 - ruined infrastructure
3. Radioactivity and Security Measurements
4. Civil Society and Researchers Contributions
5. Green Recovery of UA

Acquired competences

K01. Ability for abstract thinking, analysis, and synthesis.
K02. Knowledge and critical understanding of the subject area and professional activity.
K04. Skills in using information and communication technologies.
K05. Ability to make well-grounded decisions.
K11. Ability to justify, select, calculate, design, modify, prepare for use, and operate modern equipment and technologies for the protection and rational use of air and water environments, land resources, and waste management.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАТЕРІАЛИ

науково-практичної конференції
викладачів, аспірантів та студентів
Сумського НАУ

(14-18 квітня 2025 р.)

Зубова І. В., Липин Д. М. ПРОБЛЕМИ ЗБЕРЕЖЕННЯ ЗЕЛЕНИХ НАСАДЖЕНЬ УРБАНОЗОВАНИХ ЕКОСИСТЕМ (НА ПРИКЛАДІ М.СУМІ).....	33
Борозенко І., Кліменко Г. О. РОЛЬ СВІДОМОЇ ОСВІТИ У ФОРМУВАННІ МОРАЛЬНО-ЕТИЧНИХ ПЕРЕКОНАНЬ ЩОДО ЗБЕРЕЖЕННЯ ДОВОЛІЯ.....	34
Сурин В. С., Ковальова М. А. РОСЛИНА-БОМБАРДАТОРИ.....	36
Зубова І. В., Ковальова М. А. СТАН ПОПУЛЯЦІЙ MELICOTUS OFFICINALIS (L.) PALL НА ТЕРИТОРІЇ РІП «СВІМСЬКИЙ».....	38
Зайка Д. С. СУЧАСНІ БІОДИКАЦІЙНІ ПІДХОДИ ЩОДО ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ФЛУКТУАЦІЙ АСИМЕТРІ ЛИСТКОВОЇ ПЛАСТИНКИ.....	37
Севачко К. С. ФЛОРИСТИЧНЕ ТА ЦЕНОТИЧНЕ РІЗНОМАНІТТЯ РАЇНИК УГРУПОВАНИЙ РІП «СВІМСЬКИЙ».....	38
Серб А. О., Кривий А. С., Сивер В. Г. ХАРАКТЕРИСТИКА ОСОБОВИТНОСТЕЙ ТЕРИТОРІЇ У ДОЛІНІ р. СІПА.....	39
Демченко В. М., Гринь Б. І. БУР'ЯНИ СОНЯШНИКУ ТА ЗАХОДИ ЗАХИСТУ У ТРАІС ПІВНІЧ.....	40
Демченко В. М., Демченко В. О. ВПЛИВ ПОГОДИНИ УМОВ НА РОЗВИТОК І ПОЩЕРЕННЯ ШКІДНИКІВ В ПОСІВАХ КУКУРУДЗИ.....	41
Демченко В. М., Лавренко М. О. БУР'ЯНИ СОЇ ТА ЗАХОДИ ЗАХИСТУ У ТОВ «АГРОФАРМА «ДОВІРА 2008» РОМЕНСЬКОГО РАЙОНУ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	42
Демченко В. М., Харченко І. А. БУР'ЯНИ СОЇ ТА ЗАХОДИ ЗАХИСТУ У ТОВ МХП «УРОЖАЙНА УКРАЇНА».....	43
Ємчиш О. М., Савченко А. Д. ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ШКІДНИКІВ СОЇ ТА ОЦІНКА ЇЇ ІНСИСТИДІВНО-КАРИДИННОГО ПРЕПАРАТУ «ІНВЕРТ КЕ» В УМОВАХ ДЕРЖАВНОГО ПІДПРИЄМСТВА «ДГ ІСГ ПІВНІЧНОГО СХОДУ ІЛАН УКРАЇНИ» СУМСЬКОГО РАЙОНУ, СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	44
Ємчиш О. М., Кірич К. С. СОРТОВА СТІМКИСТЬ ЯБЛУНЬКИ НАСАДЖЕНЬ ДО БУХАРІВ В БІОСФЕРОТУРИСТИЧНОМУ ПАРКОВОМУ КОМПЛЕКСІ.....	45
Ємчиш О. М., Тополюк Т. М. ОСНОВНІ ШКІДНИКИ СОЇ В УМОВАХ АГ «ПОСТІЛ СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ» РОМЕНСЬКОГО РАЙОНУ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	46
Ємчиш О. М., Чугуновська С. І. ОСНОВНІ ШКІДНИКИ ЯМІННО ІРГО В ПІ «НАДЬ» СУМСЬКОГО РАЙОНУ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	47
Валасанець С. С. ХВОРОБИ ЗЕРНЯНИХ КУЛЬТУР ПІВНІЧНО-СХІДНОГО ЛІСОСТЕПУ УКРАЇНИ.....	48
Каленішаків В. І., Татаренко В. І. УРАЖЕНІСТЬ ЯБЛУНІ ПАРКІВ В УМОВАХ ПОЛІССЯ СУМСЬКИМ.....	49
Карпенко В., Бурдулик А. О. ФІТОСАНАТАРНИЙ КОНТРОЛЬ ПОЩЕРЕННЯ КАРАНТИННОГО БУР'ЯНУ АМВІОСІА АНТЕМІЗРОСА 1. В УКРАЇНІ.....	50
Козменко А. С., Татаренко В. І. РОЛЬ СОРТУ ДІЯ ЗАХИСТУ ЯМІННО ІРГО ВІД ПІРАМИСТОСТІ.....	51
Надольний П., Бурдулик А. О. ОСНОВНІ ХВОРОБИ СОЇ (ЗАХОДИ ЗАХИСТУ В УМОВАХ ТОВ «МХП - УРОЖАЙНА УКРАЇНА» СУМСЬКОГО РАЙОНУ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	52
Науменко Д. П., Бакученко О. М. ПІДВИЩЕННЯ ПОСХОДИСТОСТІ ОСИМОЇ ПШЕНИЦІ ЯК ВІДПІК ГЛОБАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН.....	53
Нелін В., Бурдулик А. О. ХВОРОБИ КУКУРУДЗИ ТА ЗАХОДИ В ТОВ АГРО-ПОЛІС (ІНДОНТОСІЯНИ ЕЛЕВАТОР СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	54
Овчарюк А. О. ВИДОВИЙ СКЛАД СЕГЕТАЛЬНОЇ РОСЛИННОСТІ У СОНЯШНИКОВОМУ АГРОЦЕНОЗІ ТОВ «ЗЕРНЕ» СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	55
Сурічкова І. Д. ОСНОВНІ ХВОРОБИ БУР'ЯНИ ЦИТРУСОВИХ ТА ЗАХОДИ ЇЇ КОНТРОЛЮВАННЯ В АГРОЦЕНОЗІ КУЛЬТУРИ У ТОВ «ЗАХІДНИЙ БУГ» ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	56
Татаренко В. І., Кірич Д. О. ВПЛИВ ХВОРОБ НА УРОЖАЙНОСТЬ СОНЯШНИКУ.....	57
Татаренко В. І., Тополюк Т. О. ДИНАМІКА РОЗВИТКУ ХВОРОБ КУКУРУДЗИ.....	58
Турчан Д. П., Татаренко В. І. ВПЛИВ СОРТОВИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПШЕНИЦІ ОСИМОЇ НА РОЗВИТОК ХВОРОБ.....	59
Усташенко В. А. ВИДОВИЙ СКЛАД КОМАХ ШКОД-МІВ КУКУРУДЗИ АГРОЦЕНОЗУ ТОВ «МХП - УРОЖАЙНА УКРАЇНА» СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	60
Щебачко А., Татаренко В. І. СТІМКИСТЬ ПЕРШАВ КУКУРУДЗИ ДО САМХВОРИХ ХВОРОБ.....	61
Фесенко В. В. СЕЗОННА ДИНАМІКА ДЕКАРАТІВНОСТІ СОРТІВ ТУВ ЗАХІДНОЇ В УМОВАХ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	62
Льбідь Я. Я. КОЛОРИСТИКА КВІТКОВИХ КОМПЛОЗИЦІЙ ГРОМАДСЬКИХ ПРОСТОРІВ.....	63
Плакоченко А. С. ЕКОЛОГО-МОРФОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ СОРТУ СПРЕЙ ЯПОНСЬКОЇ ПІТІЛІ РІПСИДІЗУ У ОСИМУВАНІ ПАРКОВИХ КОМПЛОЗИЦІЙ.....	64
Плакоченко І. С. ОСОБЛИВОСТІ ФЕНОЛОГІЇ УКРАЇНСЬКОЇ КАШТАНОВКО МЕНУХОНОЇ МІЛЮ ВІДВ. AESCULUS HIPPOCASTANUM ТА AESCULUS + CAMEA.....	65

СУЧАСНІ БІОДИКАЦІЙНІ ПІДХОДИ ЩОДО ДОСЛІДЖЕННЯ СТУПЕНЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ФЛУКТУАЦІЙ АСИМЕТРІ ЛИСТКОВОЇ ПЛАСТИНКИ

Зайка Д. С., студ. факультету біології, спеціалізація «Біологія»
Науковий керівник: доц. Я. М. Бондаренко
Сумський НАУ

Сучасні урбанізовані екосистеми перебувають під постійним антропогенним тиском, що зумовило необхідність розвитку інформативних методів екологічного моніторингу. Біодикація, зокрема метод флуктуючої асиметрії, виступає важливим інструментом оцінки стану навколишнього середовища, який дозволяє виявляти прояви забруднення в стані живих організмів на різних стадіях їхнього розвитку. Актуальність дослідження полягає в пошуку альтернативних способів оцінки екологічного стану урбанізованих територій в умовах неупередженого зростання техногенного навантаження (Бісонова, Ченцова, 2020).

Флуктуюча асиметрія розпадається на відношення між довжиною білатеральної асиметрії морфологічних структур, що вивчає висхідне порушення стабільності аксиметричного розвитку організмів під дією стресових факторів. Науковий метод базується на припущенні, що будь-яке відхилення від симетрії є індикатором несприятливих умов середовища, зокрема техногенного забруднення. Експериментальний метод у його основі чутливість до мінімальних змін у навколишньому середовищі, що дозволяє діагностувати потенційні екологічні ризики на різних стадіях, використовуючи традиційні методи інструментального аналізу (Куртас, Обруч, Михайленко, 2019).

Біодикаційні методи, що базуються на виміщенні флуктуючої асиметрії листової пластинки, посилають особливу увагу в сфері екологічного моніторингу в умовах глибокої інформативності та доступності (Вітовт, Бісонова, 2012). Морфометричні параметри листової пластинки дозволяють демонструвати високу чутливість до техногенних впливів, що робить їх надзвичайно цінними індикаторами стану довкілля (Бісонова, Ченцова, 2020). Перевагами даного методу є мінімальність, економічна ефективність та можливість проведення досліджень без складного лабораторного обладнання (Богданова та ін., 2010). Особливо цінним аспектом є можливість отримання інтерв'яльної оцінки ступеня техногенного навантаження цільовим аналізом морфологічних змін, які відображають комплексний вплив факторів середовища на рослині рослини (Хімік, 2020). Чисельні дослідження підтверджують, що відхилення рівня флуктуючої асиметрії є надійним індикатором порушення показувачів розвитку рослин під впливом несприятливих факторів середовища (Пілюк-Вітер, Назарова, 2023). Різноманітні директивні методи біодикації дозволяють проводити порівняльні дослідження в різних екологічних умовах, забезпечуючи репрезентативність та об'єктивність екологічних оцінок (Янік, Мілос, 2011).

Мета даного дослідження полягає в комплексному підході до аналізу морфологічних структур. Одна з переваг сучасної біодикації полягає в застосуванні біодикаційного моніторингу, яке є стандартизованим методом морфометричних вимірювань, статистичної обробки експериментальних даних та послідовної інтерпретації отриманих результатів. Особливістю методу є здатність виявляти найменші зміни в стані рослинних організмів заданою до появи інших симптомів пошкодження, що робить його надзвичайно інструментально цінним для моніторингу екологічного стану та раннього виявлення потенційних екологічних ризиків (Обруч, 2021).

Теоретичне значення методу флуктуючої асиметрії виходить з його простоти та доступності способу оцінки. Він дозволяє комплексно оцінювати екологічний стан урбанізованих територій, прогнозувати потенційні екологічні ризики та розробляти відповідні стратегії мінімізації техногенного впливу. Важливим аспектом дослідження є можливість створення інтегрованої шкали оцінки техногенного навантаження на основі показників флуктуючої асиметрії листової пластинки, що має велике потенціал для впровадження в практику екологічного моніторингу (Скворцова, 2019).

Отже, перспективність дослідження полягає в пошуку необхідного розробки інноваційних підходів до екологічного моніторингу в умовах постійного зростання антропогенного навантаження на території екосистем. Флуктуюча асиметрія виступає важливим доповненням до традиційних інструментальних методів оцінки стану довкілля, надаючи унікальну інформацію про діагностичні наслідки антропогенного впливу (Дірк, 2012). Особливу цінність представляє можливість реального діагностування потенційних екологічних ризиків, а саме концентрації забруднювачів ще до появи критичних рівнів, але вже наявності стресової реакції живих організмів. Комплексне застосування різноманітних біодикаційних методів у поєднанні з традиційними інструментальними дослідженнями створює потужну методологічну основу для вивчення впливу стану урбанізованих територій в умовах зростаючого техногену. Подальші дослідження спрямовані на вдосконалення методик, розробку нових форм біодикації та розробку уніфікованих критеріїв оцінки екологічного стану урбанізованих територій, що матиме суттєве значення для забезпечення екологічної безпеки та сталого розвитку урбанізованих територій (Богданова, Кліменко, Мейс та ін., 2012).

ДОДАТОК В
ПУБЛІКАЦІЇ

Міністерство освіти і науки України
ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
ДНУ «Інститут модернізації змісту освіти»
Казахський національний технічний університет ім.
К.І. Сатпаєва



ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ СУЧАСНОСТІ

III Міжнародна науково-практична конференція

Збірник матеріалів

20 травня 2025 року, м. Дрогобич

III Міжнародна науково-практична конференція
«Екологічні проблеми сучасності» - 2025

109

Радчик Т.О., Казанець Ю.С., Дідовський С.В. АНАЛІЗ РИЗИКІВ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ
БУДІВНИМИ ШЛАМАМИ 54

СЕКЦІЯ 3. РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ 58

Трощин Л. Миколай В. ДРІВНОМУЛЬСЬКЕ МОКРЕ ГАСНІВНЯ МЕТАЛУРГІЙНОГО
КОКСУ ЯК БІЛЬШ ЕКОЛОГІЧНА ТА РЕСУРСОБЕРІАЮЧА ТЕХНОЛОГІЯ 58

Спиринський П., Прокопенко І., Жуков О. ГЛОБАЛЬНА ПРОБЛЕМА
ВИНИЩЕННЯ ДЕФЦИТУ ПІСНОЇ ВОДИ 62

Паворська О.М., Трухлі А.І. РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ ЯК ОСНОВА ЕКОЛОГІЧНОЇ
БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВОЄННОГО ЧАСУ 65

Андреев А.І., Ніколаєв М.В., Ніколаєв К.В. ПРАВИЛЬНЕ ПРОЄКТУВАННЯ ТА
ЕФЕКТИВНЕ ВИКОРИСТАННЯ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ:
ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ ТА ЗАХИСТ ЖИТТЯ І МАЙНА 66

Ковалів Ю.В., Метрєв О.Т. ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ БІОГУНДІЯК ЯК
ПРОДУКТУ ЦІРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ 68

Явор Л., Луц О. ПЕРСПЕКТИВА ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНИХ СОРБЕНТІВ ДЛЯ
ВИДАЛЕННЯ НАФТОПРОДУКТІВ ІЗ ПРИРОДНИХ ВОД 71

Karlı Ye. RELATIONSHIP BETWEEN CONCENTRATION OF MANGANESE AND
GERMANIUM IN THE 5TH COAL SEAM OF THE PAVLOHRADSKA MINE OF THE
WESTERN DONBAS 73

СЕКЦІЯ 4. НАУКОВО-ПРАКТИЧНА ДІЯЛЬНІСТЬ В ГАЛУЗІ ОХОРОНИ НАВКОЛИЩНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА 76

Василь А. НАПРЯМКИ ДІЯЛЬНОСТІ СПЕЦІАЛІСТІВ В ГАЛУЗІ ОХОРОНИ
НАВКОЛИЩНЬОГО СЕРЕДОВИЩА 76

Мілош О., Клементка О., Тобіаша О. RISK ASSESSMENT OF POTENTIALLY TOXIC
ELEMENTS IN URBAN SOILS 80

Савицька І., Павлюк Н., Жилицька Ю., Германюк О. ЕКОСИСТЕМНІ ПОСЛУГИ
НАЦІОНАЛЬНИХ І ЛАНДШАФТНИХ ПАРКІВ ЛЬВІВСЬКОГО РЕГІОНУ
РЕКРЕАЦІЙНОГО ТА ЕКОЛОГІЧНОГО ТУРИЗМУ 82

Курчавий-Жуков І. ВПЛИВ РИЗИК ГОЛОВНОГО КОРИСТУВАННЯ НА
ГІДРОГРАФІЮ СТОКУ ПАВІДКІВ І МАЛИХ ВОДОЗБОРІВ У КАПІТАХ 85

Кучук І. ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ЯК НАПРЯМ АДАПТАЦІЇ ДО
ЗМІН КЛІМАТУ (НА ПРИКЛАДІ БАСЕЙНУ РІЧКИ ПІСДІВЦЯ) 90

Валоничий І.В., Рижаків О.В. ЗМІНОВА ДИНАМІКА ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ
ПАРАМЕТРІВ ПРУНГУ-АЦІДРУНГІЯ І ЛАНДШАФТНО-РЕЛІЄВИХ ДІЛКАХ
ВОДОЗБОРУ РІЧКИ БЕРЕЗАНЬ 93

Дубин Р., Карпен І., Муса Я. СТАН НАСАДЖЕНЬ ТА ШЛЯХИ ВИДНОВЛЕННЯ ПАРКУ-
ПАМ'ЯТКИ САДОВО-ПАРКОВОГО МІСТЕЦТВА У С. ТАРГАКІВ ЛЬВІВСЬКОЇ
ОБЛАСТІ 98

Ховалко О., Жижко Л., Пачка В., Война Н., Коваленко Ю. МЕДИКО-ЕКОЛОГІЧНА
ОЦІНКА ЯКОСТІ ПІТНОЇ ВОДИ НА ВМІСТ ВІТРАТІВ 101

Заїка Д.С. ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ТА БІОІНДИКАЦІЙНІ МЕТОДИ В СИСТЕМІ
ЕКОЛОГІЧНОГО МОНИТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ УРБАНІЗОВАНИХ
ТЕРИТОРІЙ 104

Тарас М. КЛІМАТИЧНІ ЗМІНИ ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ВОДНИЙ РЕЖИМ СХІДНОГО
РЕГІОНУ УКРАЇНИ 107

Герасименко Д.О., Мельник О.О., Луцик С.В. ГІДРОЛОГІЧНІ ОБ'ЄКТИ СУМСЬКОЇ
ОБЛАСТІ ЯК ОДНІЙ ПІ ОСНОВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ У СІЛЬСЬКОМУ ЕКОТУРИЗМІ 110

Vakul A.P. SPECIES COMPOSITION OF HIGHER VASCULAR PLANTS NSC
«BOTANICAL GARDEN OF SUMSPU NAMED AFTER A. S. MAKARENKO» 113

Морозов С.В. ПРИРОДНО-ІАЛЮВЦІЙНИЙ ФОНД ЗВІНИГОРОДСЬКОГО РАЙОНУ 115

Сарбала В.М., Дубин О.С. ФАКТОР ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИРОЗІЙНИХ ЗАХОДІВ
ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ЕРОЗІЇ ҐРУНТУ 116

III Міжнародна науково-практична конференція
«Екологічні проблеми сучасності» - 2025

104

*Заїка Д.С., студентка Ім курсу спеціальності 101 «Екологія»
Сумської національної аграрної університету*

ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ТА БІОІНДИКАЦІЙНІ МЕТОДИ В СИСТЕМІ ЕКОЛОГІЧНОГО МОНИТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Зростаюча урбанізація загострює проблему забруднення атмосферного повітря, що вимагає комплексного підходу до оцінки його якості [10]. Моніторинг повітря регламентований державним положенням [12], проте традиційні інструментальні методи, незважаючи на точність, мають часові та просторові обмеження [2]. За даними ВООЗ, забруднення повітря є одним із головних факторів ризику для здоров'я, що особливо актуально для України з її застарілими виробничими фондами та зростаючою кількістю автотранспорту [2].

Повітряне середовище міст характеризується специфічним поєднанням природних та антропогенних факторів, які формують складну багатоконпонентну систему забруднення. Зростання промислових викидів, збільшення кількості транспортних засобів призводить до формування стійких зон забруднення, які негативно впливають на здоров'я населення та стан міських екосистем [10].

Інструментальні методи моніторингу регулюються нормативними документами: ДСТУ 8725:2017 [6], ДСТУ 8726:2017 [7] та ДСТУ 8812:2018 [8]. Автоматизовані системи моніторингу, як «ЕкоІнспектор» [11], забезпечують контроль викидів, але мають обмеження: висока вартість обладнання, складність створення мережі постів та оцінки кумулятивного ефекту забруднювачів [2]. Методи поділяються на автоматичні, напіваавтоматичні та мануальні [10], а за часом режимом - на безперервні, періодичні та епізодичні [11].

Класична система інструментального моніторингу атмосферного повітря базується на мережі стаціонарних постів спостереження, які обладнані приладами для відбору проб та аналізу концентрацій забруднювачів. Основними забруднювачами, які підлягають обов'язковому контролю, є оксид сірки та азоту, оксид вуглецю, озон, завислі частки та важкі метали. Результати інструментальних вимірювань використовуються для розрахунку індексів забруднення атмосфери та оцінки відповідності концентрацій забруднювачів нормативам ГДК [10].

Обмеження інструментальних методів є їх локальність - вони надають інформацію про концентрації забруднювачів у конкретних точках відбору проб, що не дозволяє отримати повну картину забруднення для всієї території міста. Крім того, інструментальні методи не враховують синергетичний ефект від одночасної дії різних забруднювачів [2].

Біоіндикація як доповнення до інструментальних методів дозволяє оцінювати стан середовища за реакцією живих організмів [3]. Переважна перевага біоіндикації, виявлення забруднювачів на різних стадіях, оцінка

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**МАТЕРІАЛИ
ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ НАУКОВОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ СТУДЕНТІВ
ТА АСПІРАНТІВ, ПРИСВЯЧЕНОЇ
МІЖНАРОДНОМУ ДНЮ СТУДЕНТА**

(17-21 листопада 2025 р., м. Суми)

Абрамчук А.Ю., Анисименко А.Ю. ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ «LUMINA У АГРОБІОТЕХНОЛОГІЇ	36
Анісімов О.Ю. ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЙ ІНКУБАЦІЇ НАСІННЯ ТА МІНЕРАЛЬНОГО ЖИВЛЕННЯ НА	37
ПРОДУКТИВНІСТЬ ТА ЯКОСТЬ ЗЕРНА ГРЕЧКИ В УМОВАХ ПІВНІЧНО-СХІДНОГО ПОСОСТЕВУ	
УКРАЇНИ	
Бадрик Р.А. ЕФЕКТИВНА СИСТЕМА УДОБРЕННЯ КУКУРУДЗИ - КЛОЧ ДО СТАВЛЯНОГО	38
ВРОЖАЮ	
Береза Д.А. ВРОЖИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ У МАСОВОМУ ДОБОРІ ЗА ПРОДУКТИВНОСТІ	39
МЕТОДОМ ГРУПУВАННЯ ГРУПІВ КАРТОПЛІ ЗА ФОРМУВАННЯМ ГЕНЕРАТИВНИХ ОРГАНІВ	
Вітовська Г.В., Лобченко В.О. РЕГУЛЮВАННЯ У БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ ЗІ	40
ВИКОРИСТАННЯМ ГЕНЕТИЧНО МОДИФІКОВАНИХ ОРГАНІЗМІВ	
Горішнюк О.М., Білозерська М.Б. ЕФЕКТИВНІСТЬ КРАПЕЛЬНОГО ПОЛІВУ КАРТОПЛІ ЗА	41
РІЗНИХ РІВНІВ ВОЛОГОСТІ ГРУНТУ	
Дубовий В.І. БІОТЕХНОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЗАХВАСКИ ДІЯ КІФУ	42
Засорко В.С., Борзенко І.В. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПОДАЛЬШОГО ГЕНЕРАЦІЙНОГО	43
РОЗМНОЖЕННЯ КАРТОПЛІ, ОТРИМАНОЇ З КУЛЬТУРИ МЕРИСТЕМ IN VITRO	
Зеленська В.В. ПЕРСПЕКТИВА ПРОМИСЛОВОЇ КУЛЬТИВАЦІЇ <i>BACILLUS SUBTILIS</i> ДЛЯ	44
ВИРОБНИЦТВА СУРЖАКТАНТІВ	
Іван А.В. ОРГАНІЗАЦІЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНОГО КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ПРІСДУЩІ НА ПРАТ	45
«ОКТИРСЬКИЙ ПИЛОВАНИЙ ЗАВОД»	
Покваренко Д.В., Радченко І.О. ВИКОРИСТАННЯ БІОЛОГІЧНИХ АГЕНТІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ ЗЕРНА	46
ПІД ЧАС ЗБЕРІГАННЯ	
Поліщак М.Д., Білозерська М.Б. АДАПТИВНИЙ ПОТРАЦІЛАННЯ СОРТІВ КАРТОПЛІ ЗА УМОВ	47
АБОТНИЧКИХ СТРОГІВ ПІВНІЧНО-СХІДНОГО ПОСОСТЕВУ УКРАЇНИ	
Сардан П.В. ВПЛИВ СЕРВІСИ БУТІВ БОПРЕПАРАТАМИ НА ПОКАЗНИКИ ТОВАРИНОСТІ РАНИХ	48
СОРТІВ КАРТОПЛІ В УМОВАХ ПІВНІЧНО-СХІДНОГО ПОСОСТЕВУ УКРАЇНИ	
Шенч А.С., Білозерська М.Б. ПЕРСПЕКТИВА РЕАЛІЗАЦІЇ ПОТЕНЦІАЛУ ДІСТІНЧНИХ СОРТІВ	49
КАРТОПЛІ В УМОВАХ ПІВНІЧНО-СХІДНОГО ПОСОСТЕВУ УКРАЇНИ	
Левченко І.В. БІОТЕХНОЛОГІЧНИ АСПЕКТИ ЖИТТЯНОГО ЦИКЛУ	50
Асканів Р.А., Селев В.Г. БІОРИЗНОМАНІТІЯ ЯК ІНДИКАТОР СТАНУ ЕКОСИСТЕМНИХ ПОСЛУГ	51
ЛАНДШАФТНИХ ЗАКАЗНИКІВ КРАСНОПІЛЬСЬКОЇ ТЕРИТОРІАЛЬНОЇ ГРОМАДИ	
Василько Я.В. АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ЛІСОВИХ	52
ЕКОСИСТЕМ СУМСЬКОГО ПОЛІССЯ	
Вашченко З.О. ВПЛИВ ВИРОБНИЧКИХ ДІЙ НА СТАН ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ	53
СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ	
Береза І.В. ВИДИ РОДИНИ DAMASCEAE – ВАЖЛИВІ КОМПОНЕНТИ ПРИБЕРЕЖНИХ	54
ВГОЩЕННЯ ВЕРХНЬОЇ ТА СЕРЕДНЬОЇ ТЕЧІ РІВНИ ВОРСЬКА	
Бондаренко М.А. ФІТОІНДИКАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ ФАКТОРІВ, ЩО ВИЗНАЮТЬ	55
ПОПУЛЯЦІЙНІ ПОКАЗНИКИ ЛІКАРСЬКИХ РОСЛИН	
Клименко І.М., Аліпченко Д.С. ВПЛИВ СІМІОТІЧНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ І ВОСНІЧНИХ ФАКТОРІВ НА	56
РІЗНИСІ ОРХИДІ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ (НА ПРИКЛАДІ ДАСТУЛОХИДА <i>ANCAHATA</i>)	
Михайленко В.А. ВИДИ УРБАНОВОРИ, ЯКІ ОЦІНЮЮТЬ ПОВІТРЯ	57
Філіченко В.О. ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОД Р. СУТА У МЕЖАХ СУМСЬКОЇ	58
ОБЛАСТІ	
Лещенко Д.О. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА АСЦЕРІАС СУРЬАСА С. ТА ІСТОРІЯ ЙОГО	59
ПОШИРЕННЯ	
Соловйова К.В. ЗМІНИ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ В М. СУМІ ВНАСЛІДОК ВОСНІЧНИХ ДІЙ	60
Давидь Д.М. МОНИТОРИНГОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІСОВИХ РЕСУРСІВ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ В	61
УМОВАХ ВОСНІЧНОГО СТАНУ	
Лавренченко І.С. МОНИТОРИНГ ФІЗИОЛОГІЧНОГО РІЗНОМАНІТТЯ ПРИРОДНИХ БІОТОПІВ	62
СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ	
Лавина І.В. ЕКОСИСТЕМНІ ПОСЛУГИ ТА БІОРИЗНОМАНІТТЯ УРБАНОЕКОСИСТЕМ У КОНТЕКСТІ	63
РОЗВИТКУ КІБЕРНІТУ	
Мельник М.В. ОСНОВНІ ЗАБРУДНОВАЧІ ПОВЕРХНЕВИХ ВОДОМ	64
Токаренко В.В. ПРИРОДНО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РІВНОК СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ	65
Савицька Н.В. ПРОБЛЕМИ І ШЛЯХИ ВІДВОРОТЕННЯ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ	66
ПРИРОДНО-ЗАПОВІДНОГО ФОНДУ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ	
Судня В.В. ПОПУЛЯЦІЯ ПОДОРОЖНИКА БЕЛІКОГО В УМОВАХ МІСТА СУМИ НА ГРАДІЕНТІ	67
ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ	
Криворуд В.І. СЕГЕТАЛЬНІ ВИДИ ЯК ІНДИКАТОРИ СТАНУ ЕКОСИСТЕМ: МЕТОДИ ТА	68
ПЕРСПЕКТИВИ ВИВЧЕННЯ	
Таранів Д.С. КОМПЛЕКСНА БІОІНДИКАЦІЙНА ОЦІНКА ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ М.	69
СУМІ В УМОВАХ ВОСНІЧНОГО СТАНУ	
Борковська А.М. БУРТНИ КУКУРУДЗИ ТА ЗАХОДИ ЗАХИСТУ У ФЕРМЕРСЬКОМУ	70
ГОСПОДАРСТВІ «МАНУША» РОМЕНСЬКОГО РАЙОНУ СУМСЬКОЇ ОБЛАСТІ	

**КОМПЛЕКСНА БІОІНДИКАЦІЙНА ОЦІНКА ЯКОСТІ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ М. СУМИ
В УМОВАХ ВОСНІЧНОГО СТАНУ**

Таранів Д.С., студ. 2м курсу ФАНП, спец. 130 «Біологія»
Науковий керівник: доц. П. М. Бондаренко
СУМСЬКИЙ НАУ

Забруднення атмосферного повітря урбанізованих територій залишається критичною екологічною проблемою, адже погіршується в умовах воєнного стану через обмеження традиційних інструментального моніторингу та пошуку джерел дисперсії викидів від бойових дій. Біоіндикаційні методи дозволяють отримати інтегральну оцінку довготривалого впливу забруднювачів, виявити «смертєлі» ефекти та оцінити біологічне наслідки на рівнях, недоступних для приладів. Метою роботи стала комплексна оцінка якості атмосферного повітря м. Суми шляхом інтеграції методів біоіндикації та функціональної асиметрії. Зробив дослід з використанням результатів даних офіційного моніторингу для виявлення критичних зон та розробки рекомендаційних заходів.

Дослідження проводились у серпні 2025 р. на п'яти точках градієнту антропогенного навантаження: ПЗФ «Міжлітвська цілина» (фоновий територія, 15 км від міста), території СНАУ (міжвузковий), ПСЗ №3 (вул. Холосерської братів), зони між вул. Харківська та вул. Тернопільська, ПСЗ №6 (вул. Металурга - дитсадок «Тернопілля», промислова зона). На кожній точці обстежено 7 дерев різних порід: проводили морфометричні вимірювання 5 біологічних ознак на 350 листках та обчислювали асиметрію лінійності з використанням показника Q. Статистична обробка виконана в STATISTICA 10.0. Умови воєнного часу ускладнили дослідження: на ПСЗ №4 під час роботи стався раптовий удар по території СНАУ, на ПСЗ №6 мазова обліта брала зупинила асфальтний вибір на території дитсадока «Тернопілля».

Встановлено «чужий» просторовий градієнт забруднення: показники функціональної асиметрії зростають від фоники 0,028 (через 0,943 ПСЗ №3, 0,368 (СНАУ), 0,375 ПСЗ №4) до критичних 0,094 (ПСЗ №5), показник Q змінюється від 0,72 до 0,27 відповідно. Однофакторний дисперсійний аналіз підтвердив високу статистичну значущість відмінностей (F(3,30) = 84,917, p < 0,001), територіальний фактор пояснює 91,2% варіабельності. Кореляція між методами біоіндикації r = -0,824 (p < 0,05) підтверджує взаємодоповнюваність при різних часових масштабах.

Встановлено високу угодненість з офіційним моніторингом: зони максимального забруднення (перевантаження ПДК по тлі до 2,8 разів на ПСЗ №5, по NO₂ до 1,4 разів на ПСЗ №4) співпадають з критичними біоіндикаційними показниками. Кореляція функціональної асиметрії з концентрацією тліту r = 0,59 (p < 0,01), показник Q з ПЗФ = -0,55 (p < 0,05), що підтверджує можливість використання біоіндикації для розширення моніторингової мережі з мінімальними витратами.

Визначено критичний екологічний стан біля дитсадока «Тернопілля» (ПСЗ №5): максимальна функціональна асиметрія 0,100 на тлізовому надрівні (перевантаження фону у 3,6 разів), мінімальна лінійна дисперсія Q = 0,27 (наближення до «линійності» тліту), повна відсутність листяних та брунчатих лінійності. Показано спостережувані температурні зміни: зменшення площі листків на 25-30%, масовий крайовий скорості (30-40% площі), нерівномірні плями, чорний наліт. Територія знаходиться в зоні впливу промислових викидів (АТ «Сумське НВО» - 600 м, ПАТ «Сумський промисел»), інтенсивного автопарку та побутових джерел, що становить пряму загрозу для здоров'я дітей (8-10 років на роботу на території). Наголошено високу покритість на території СНАУ (до 0,097 локально) покритості повітря: висока будівельна робота, підвищені чутливість методу до короткострокових стресових факторів.

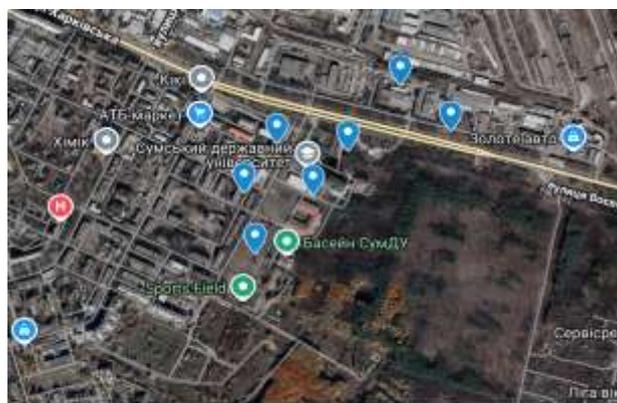
Проведення дослідження в умовах воєнного стану кваліфікує дисперсію джерел забруднення (продукти вибухів, порох броневої) та підвищує стійкість біоіндикаційних методів до екстремальних умов. Комплексне застосування двох методів дозволило диференціювати поглині локальні стресори від тривалого системного забруднення, що критично важливо для територіальної оцінки. Розроблено конкретні рекомендації для оцінки місцевого самозабудження: термінові заходи для критичних зон (фільтрація повітря у дитсадку «Тернопілля», обмеження часу перебування дітей на майданчиках у літні заборони, старовина замінок багаторічних, відновлення «лінійності» тліту, припинення необдуманих обробок дерев-біоіндикаторів комерційними службами) та стратегічні націлені дії для покращення екологічної реалізації. Високі коефіцієнти кореляції біоіндикаційних показників з даними інструментального моніторингу (r = 0,59 для ФА з концентрацією тліту, r = -0,55 для Q з ПЗФ) підтверджують ефективність об'єктивного оцінки екологічного стану та доцільність використання біоіндикації як економічно ефективного доповнення до традиційних методів. Особливий уваги потребує термінове впровадження заходів щодо у районі дитсадока «Тернопілля», де зареєстровано максимальні показники забруднення серед усіх досліджених точок.

ДОДАТОК В

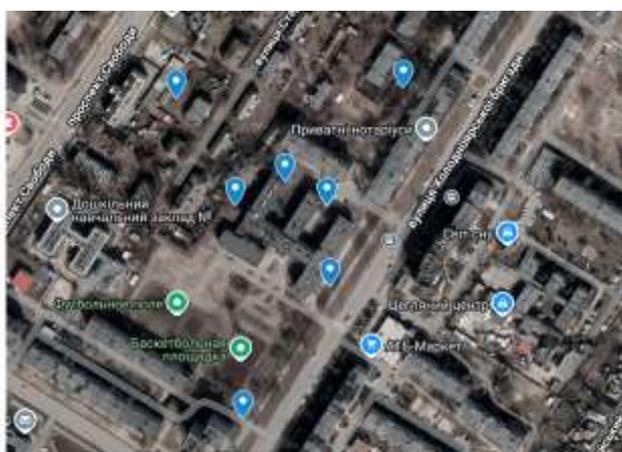
РОЗТАШУВАННЯ ТОЧОК ДОСЛІДЖЕННЯ



Розташування досліджуваних дерев на території СНАУ



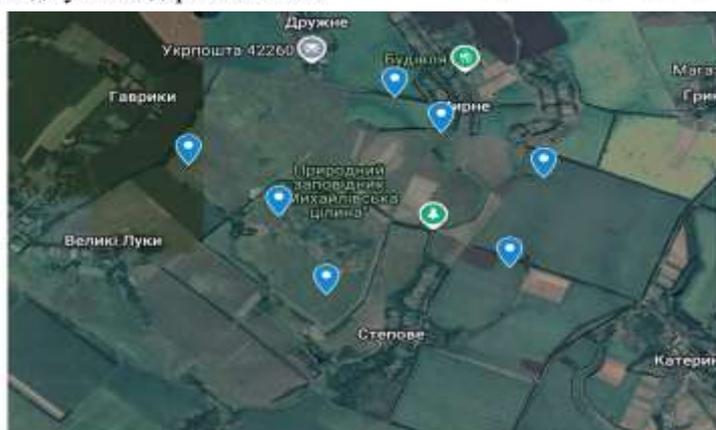
Розташування досліджуваних дерев на ПСЗ № 4



Розташування досліджуваних дерев на ПСЗ 3



Розташування досліджуваних дерев на ПСЗ № 5



Розташування досліджуваних дерев на території
ПЗ «Михайлівська цілина»