**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет плодоовочівництва, екології та захисту рослин

Кафедра екології та безпеки життєдіяльності

**Допущено до захисту**

«___» _____ 2025 року

**Зав. кафедри**, к. с.-г., доцент

_____Ольга ВАСИЛЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
магістра

# БІОІНДИКАЦІЯ ЯК МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ҐРУНТУ ТА ВПЛИВУ ЗАБРУДНЮВАЧІВ НА ФЛОРУ

Виконав: студент ІІ курсу, групи 21м-ек

спеціальності 101 Екологія

освітньо-професійної програми

Екологія

Сергій СТАРОКОЖЕВ

Керівник: к. с.-г. н., доцент Ігор ГУРСЬКИЙ

Умань – 2025

ЗМІСТ

Стор.

ВСТУП…….....…….....3
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ БІОІНДИКАЦІЇ (огляд літератури).....5
1.1. Сучасні підходи до біоіндикації ……...……...5
1.2. Сучасні методологічні підходи у фіто індикації…….8
1.3. Сучасні підходи до біоіндикації ґрунтового покриву……..10
1.4. Сучасні підходи до фітоіндикації якості атмосферного повітря……11
РОЗДІЛ 2. УМОВИ, ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ..14
2.1. Кліматичні умови регіону досліджень……..…….....14
2.2. Об'єкт дослідження.....16
2.3. Методика проведення досліджень…….....17
2.4. Охорона праці……...20
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ…….....22
3.1. Фітоіндикаційна оцінка якості ґрунтів у різних функціональних зонах м. Звенигородка…….22
3.2. Фітоіндикація урбанізованого середовища м. Звенигородка……26
РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА……...31
ВИСНОВКИ…….....33
ПРОПОЗИЦІЇ…….34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….....35
ДОДАТКИ……..40

# ВСТУП

**Актуальність теми.** Сучасний стан урбанізованих середовищ вимагає розробки ефективних методів оперативного моніторингу, що обумовлено інтенсифікацією антропогенного навантаження. Традиційні методи хімічного аналізу, хоч і забезпечують точні кількісні показники, є ресурсоємними та не відображають інтегральний вплив забруднювачів на живі організми. Біоіндикація пропонує альтернативний підхід, що дозволяє оцінювати біологічно доступні форми забруднюючих речовин та їх кумулятивний ефект у екосистемах.

Актуальність фітоіндикаційних досліджень полягає в їх здатності виявляти довгострокові тенденції забруднення через накопичувальні властивості рослин. Рослини-біоіндикатори інтегрують вплив комплексу факторів протягом вегетаційного періоду, що дозволяє оцінити не лише поточний стан середовища, але й динаміку його змін. Це особливо важливо для моніторингу міських екосистем, де спостерігається складне поєднання різних видів забруднювачів.

Практична значущість біоіндикаційних методів полягає в їх економічній ефективності та можливості охопити значні території. Розробка стандартизованих підходів до фітоіндикації дозволяє створювати ефективні системи екомоніторингу для міст із обмеженим фінансуванням. Отримані дані є основою для обґрунтування необхідних рекультиваційних заходів та розробки стратегій оптимізації використання міських територій, що безпосередньо впливає на якість життя населення та стан навколишнього середовища.

**Мета роботи.** Метою роботи є комплексна біоіндикаційна оцінка урбоекосистеми м. Звенигородка шляхом аналізу флористичного складу різних функціональних зон.

Для досягнення даної мети були поставлені наступні завдання:

– оцінка антропогенного навантаження на ґрунтовий покрив за флористичними показниками;

– індикація властивостей ґрунтового середовища за екологічними шкалами;

– оцінка морфологічних змін у вищих рослин під впливом забруднення повітря;

– визначення стану лишайникового покриву та інтегральна оцінка забруднення повітря.

**Наукове та практичне значення одержаних результатів:**

**Наукове значення** одержаних результатів полягає у вдосконаленні методології комплексної біоіндикації ґрунтів урбанізованих територій шляхом поєднання фітоіндикаційних шкал Д. М. Циганова з розрахунком коефіцієнта синантропізації. Отримані дані розширюють уявлення про закономірності формування рослинного покриву в умовах антропогенного впливу та розкривають механізми адаптації флори до різних типів забруднення. Результати дослідження становлять значний внесок у розвиток теорії урбоекології та створення наукових основ моніторингу стану міських екосистем.

**Практичне значення** дослідження визначається можливістю використання розробленої методики для оперативної оцінки якості урбоекосистеми без застосування дорогого обладнання. Отримані результати дозволяють обґрунтувати пріоритетні напрями рекультиваційних заходів для різних функціональних зон міста та розробити рекомендації щодо оптимізації використання міських територій. Матеріали дослідження можуть бути використані місцевими органами влади для планування екологічних заходів, створення системи моніторингу та прийняття управлінських рішень щодо поліпшення стану довкілля.

*Об'єкт дослідження* – урбоекосистема м. Звенигородка, зокрема ґрунтовий покрив та рослинні угруповання різних функціональних зон.

*Предмет дослідження* – закономірності антропогенної трансформації ґрунтового покриву та рослинності, що виявляються через біоіндикаційні показники, а також взаємозв'язок між рівнем антропогенного навантаження та станом фітоценозів.

Результати досліджень були представлені на Всеукраїнській студентській науковій конференції (м. Умань, Уманський національний університет, 24 квітня 2025 р.), яка була присвячена 125-річному ювілею професора С. С. Рубіна, визначного вченого-аграрія (додаток А).

# РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ БІОІНДИКАЦІЇ (огляд літератури)

## 1.1. Сучасні підходи до біоіндикації

Сучасна епоха характеризується глибокою модифікацією природного середовища під впливом антропогенної діяльності, яка досягла безпрецедентних планетарних масштабів. Інтенсивність та швидкість трансформації екосистем значно випереджають вплив природних факторів, що зумовлює системне погіршення стану біосфери та загострення проблеми її охорони [1]. Ця глобальна тенденція вимагає розробки ефективних інструментів моніторингу, здатних адекватно оцінювати масштаби та наслідки антропогенного впливу.

Ідентифікація біологічно значущих антропогенних навантажень потребує застосування інноваційних підходів, серед яких особливе місце займає біоіндикація. Цей метод базується на аналізі реакції живих організмів та їх угруповань на зміни факторів середовища, що дозволяє виявляти навіть незначні, але біологічно значущі зрушення в екосистемах. Рослинний покрив, будучи високочутливою системою, виконує функцію інтегрального індикатора стану навколишнього середовища [2, 3].

Важливість фітоіндикації полягає в її здатності відображати емерджентний характер змін властивостей екосистем. Емерджентність як фундаментальна властивість складних систем проявляється у виникненні нових якостей, не властивих окремим їх компонентам. У контексті екологічних досліджень це означає, що реакція рослинного покриву на антропогенний вплив не може бути зведена до суми реакцій окремих видів, що робить його особливо цінним об'єктом для екологічної експертизи та прогнозування [4].

Міські екосистеми, будучи найбільш трансформованими в результаті господарської діяльності, потребують особливо ретельного моніторингу. Урбанізовані території характеризуються комплексним забрудненням, що включає як хімічні, так і фізичні фактори впливу [5]. Біоіндикаційні методи

дозволяють інтегрувати ці різнорідні впливи в єдиний показник екологічного стану.

Сучасні системи моніторингу, засновані на спостереженнях за реакцією рослинних організмів, демонструють високу ефективність у оцінці біологічних наслідків забруднення. Фізіологічні та морфологічні зміни у рослин, такі як порушення процесів росту, диференціації вегетативних і генеративних органів, зміни пігментації, слугують точними індикаторами якості довкілля. Ці властивості, відомі з давніх часів, знаходять нове застосування в сучасних екологічних дослідженнях [6].

Біоіндикація як метод оперативного моніторингу ґрунтується на систематичних спостереженнях за станом і поведінкою біологічних об'єктів [7]. Переваги рослин-індикаторів полягають у їхній чутливості до комплексного впливу факторів середовища, що дозволяє фіксувати взаємодію різних забруднювачів [8].

Біологічно-індикаторний підхід заснований на вивченні впливу мінливих факторів зовнішнього середовища на структурно-функціональні характеристики біологічних систем. Вибір біоіндикатора визначається його чутливістю до досліджуваних факторів, при цьому зміни в його стані порівнюються з еталонними показниками [9]. Наприклад, спостереження за гідробіонтами дозволяє оцінювати стан водних екосистем з високою точністю.

Рослини-індикатори демонструють високу чутливість до змін мінерального складу ґрунтів, що знаходить застосування як в екологічному моніторингу, так і в пошуковій геології. Критерії відбору біоіндикаторів включають оптимальний рівень чутливості, тривалість життєвого циклу та репрезентативність поширення, що забезпечує їх ефективне використання на різних територіях [10].

Порівняльний аналіз біологічних та інструментальних методів моніторингу свідчить про значні переваги біоіндикації, зокрема її економічну ефективність та здатність інтегрувати довгостроковий вплив факторів середовища. Екологічні біоіндикаційні методи, такі як ліхеноіндикація та

бріоіндикація, дозволяють реконструювати умови середовища на основі аналізу видового складу та стану відповідних організмів [11].

Сучасне розуміння біологічного індикатора передбачає розгляд його як біологічної системи, наявність та стан якої корелює з певними умовами середовища [12]. Широке використання біоіндикаторів у практиці моніторингу довкілля базується на їхній здатності акумулювати вплив різних забруднювачів.

Біологічні індикатори знаходять застосування в різних галузях - від оцінки якості водних ресурсів до космічних досліджень [13]. Зміни еколого-фізіологічних характеристик рослин, зумовлені антропогенним впливом, слугують точними індикаторами стану довкілля.

Інтеграція біоіндикаційних методів з сучасними інструментальними підходами відкриває нові перспективи в екологічному моніторингу [14]. Поєднання якісних оцінок, що надаються біоіндикаторами, з кількісними даними фізико-хімічних методів дозволяє отримати комплексну характеристику стану екосистем.

Сучасні тенденції розвитку біоіндикації передбачають розширення спектру використовуваних організмів та вдосконалення методів інтерпретації отриманих даних [15]. Використання рослин-індикаторів для виявлення специфічних забруднювачів та оцінки загального стану довкілля стає невід'ємною складовою систем екологічного моніторингу.

## 1.2. Сучасні методологічні підходи у фітоіндикації

Сучасний етап розвитку фітоіндикації характеризується інтеграцією системного підходу з комп'ютерними технологіями, що дозволяє підвищити точність та об'єктивність досліджень. Впровадження цифрових методів аналізу значно розширило можливості обробки великих масивів даних, що відображено в сучасних наукових публікаціях. Міжнародний досвід свідчить про активну розробку теоретичних основ фітоіндикації, особливо у країнах Західної Європи, де спостерігається диференціація наукових напрямів відповідно до специфіки індикаторів та досліджуваних факторів [16].

Агроіндикація як один з найдавніших напрямів розвинулася на основі праць Л. Г. Раменського та його послідовників. Створені ними фітоіндикаційні екологічні шкали зазнали подальшого вдосконалення І. А. Цаценкіним і знайшли широке практичне застосування у типології земель та оцінці умов місцезростання [17]. Особливе значення мають розробки Д. М. Циганова, який систематизував та удосконалив попередні підходи, розробивши спеціалізовані шкали для хвойно-широколистяної підзони [18]. Його методика відрізняється строгішим підходом до вибору факторів і скороченням кількості градацій, що підвищило точність індикації.

Лісова типологія, заснована на роботах Г. Ф. Морозова та розвинена Є. В. Погребняком і Д. В. Воробйовим, використовує види-індикатори для оцінки екологічних умов лісових екосистем. Створення "двокоординатної едафічної сітки" та подальше вдосконалення цієї методології дозволило розробити ефективні підходи до класифікації лісів [19].

Сучасний етап розвитку фітоіндикації характеризується появою нових спеціалізованих напрямів, зокрема дендроіндикації, що базується на аналізі річних кілець дерев [20]. Значний потенціал мають методи градієнтного аналізу та ординації, розроблені вісконсінською школою, які дозволяють оцінювати режими екологічних факторів у трав'янистих угрупованнях [21].

Окрему увагу приділяється природоохоронній індикації, яка розвивається у зв'язку з загостренням екологічних проблем. Сучасні дослідження в цьому напрямі базуються на дистанційних методах зйомки та спектрометруванні, що дозволяє визначати межі забруднення та оцінювати фізіологічний стан рослин.

У контексті глобальної антропогенної трансформації навколишнього середовища фітоіндикація набуває особливої актуальності як інструмент оцінки та прогнозування стану екосистем. Незважаючи на песимістичні оцінки щодо можливостей теоретичного моделювання екосистем [22], фітоіндикаційні методи пропонують практичний підхід до вирішення цих складних завдань.

Розвиток сучасних фітоіндикаційних досліджень характеризується прискоренням та диверсифікацією методологічних підходів. Створення нових та вдосконалення існуючих екологічних шкал, розробка спеціалізованих

комп'ютерних програм для обробки даних, інтеграція дистанційних методів дослідження – все це свідчить про перспективність фітоіндикації як наукового напряму.

Таким чином, фітоіндикація продовжує розвиватися як міждисциплінарний напрям, поєднуючи традиційні підходи з сучасними технологіями, що відкриває нові можливості для моніторингу та охорони навколишнього середовища.

## 1.3. Сучасні підходи до біоіндикації ґрунтового покриву

Сучасні дослідження в галузі біоіндикації ґрунтів демонструють перехід від традиційних методів до комплексних підходів, що базуються на використанні різних трофічних рівнів біологічних систем. За останні п'ять років спостерігається значне зростання кількості публікацій, присвячених розробці інтегральних показників якості ґрунтів на основі біологічних критеріїв [23]. Дослідження останніх років підтверджують ефективність використання мікроорганізмів як чутливих індикаторів антропогенного впливу на ґрунтові екосистеми [24].

Сучасні дослідження демонструють перспективність використання мікробних співтовариств для оцінки стану ґрунтів. Метагеномні дослідження показують, що співвідношення бактерій та грибів є чутливим індикатором антропогенного навантаження [25]. Дослідження Rodriguez et al. [26] доводять, що «індекс мікробного розмаїття може слугувати надійним показником ступеня деградації ґрунтового покриву в урбанізованих середовищах».

Рослинні організми продовжують залишатися важливим об'єктом біоіндикаційних досліджень. Сучасні дослідження підтверджують ефективність використання листяних мохів як біоіндикаторів важких металів у міських ґрунтах [27]. Інноваційним підходом є використання флуоресцентних параметрів фотосинтезу для оцінки стресового стану рослин у забруднених ґрунтах [28].

Значний прогрес спостерігається у дослідженнях ґрунтової фауни як біоіндикатора. Дослідження Gupta et al. [29] демонструють чутливість ногохвісток (*Collembola*) до змін pH та вмісту важких металів у ґрунтах. Сучасні методики включають аналіз видового розмаїття та чисельності дощових черв'яків як інтегрального показника якості ґрунтів [30].

Сучасний підхід до біоіндикації ґрунтів передбачає використання комплексних систем, що поєднують різні біологічні індикатори. Дослідження Li et al. [31] пропонують інтегральний індекс якості ґрунтів на основі аналізу мікробних співтовариств, ферментативної активності та різноманіття ґрунтової фауни. Розробка стандартизованих протоколів біоіндикації залишається пріоритетним напрямком досліджень.

Найбільш перспективними напрямами сучасних досліджень є розробка швидких молекулярних методів біоіндикації та створення автоматизованих систем моніторингу. Дослідження Wilson et al. [32] демонструють потенціал використання ДНК-метабаркодингу для оцінки стану ґрунтових екосистем. Інноваційним підходом є використання нейронних мереж для аналізу біоіндикаційних даних [33].

Сучасна наука про біоіндикацію ґрунтів розвивається у напрямі створення універсальних методологічних підходів, що дозволяють інтегрувати дані різних рівнів біологічної організації для комплексної оцінки стану ґрунтового покриву в умовах антропогенного навантаження.

## 1.4. Сучасні підходи до фітоіндикації якості атмосферного повітря

Останні п'ять років характеризуються інтенсивним розвитком методів фітоіндикації атмосферного повітря, зокрема в урбанізованих середовищах. Дослідження [34] демонструють ефективність використання листяних дерев як біомоніторів забруднення повітря важкими металами та поліциклічними ароматичними вуглеводнями. Сучасні підходи включають аналіз асимілюючих органів рослин для оцінки довгострокового впливу забруднювачів.

Лишайникові організми продовжують залишатися найбільш вивченими біоіндикаторами якості атмосферного повітря. Дослідження [35] підтверджують високу чутливість епіфітних лишайників до діоксиду сірки та оксидів азоту. Сучасні методики включають використання ліхеноіндикаційних індексів для оцінки просторового розподілу забруднення в міських екосистемах [36].

Сучасні дослідження доводять ефективність використання вищих рослин для моніторингу газоподібних забруднювачів. Дослідження [37] демонструють можливість використання морфологічних змін листкових пластинок для оцінки впливу озону. Інноваційним підходом є використання флуоресцентної спектроскопії для виявлення стресових станів рослин, викликаних забрудненням повітря [38].

Мохові організми знаходять все більш широке застосування як біоіндикатори атмосферного забруднення. Дослідження [39] підтверджують ефективність використання мохів для моніторингу атмосферних викидів важких металів. Сучасні методики включають аналіз акумуляційної здатності мохів щодо мікрочастинок пластику в атмосферному повітрі/

Останні роки характеризуються розвитком високотехнологічних методів фітоіндикації. Дослідження [40] демонструють потенціал використання дистанційного зондування для оцінки стресових станів рослинності, викликаних забрудненням повітря. Інноваційним напрямком є застосування спектрального аналізу для виявлення ранніх ознак ураження рослин забруднювачами [41].

Сучасний підхід до фітоіндикації передбачає розробку комплексних систем моніторингу. Дослідження [42] пропонують інтегральну методику оцінки якості повітря на основі аналізу різних біоіндикаторів – від лишайників до вищих рослин. Особливу увагу приділяється розробці стандартизованих протоколів біомоніторингу [43].

Найбільш перспективними напрямами сучасних досліджень є розробка швидких молекулярних методів оцінки впливу забруднення повітря на рослинні організми. Дослідження [44] демонструють потенціал використання біомаркерів окислювального стресу для ранньої діагностики ураження рослин.

Інноваційним підходом є використання машинного навчання для прогнозування впливу забруднення повітря на рослинні екосистеми.

Сучасна фітоіндикація атмосферного повітря розвивається у напрямі створення комплексних систем моніторингу, що поєднують традиційні методи з сучасними технологіями, що дозволяє отримувати об'єктивну інформацію про стан атмосферного середовища в умовах антропогенного навантаження.

# РОЗДІЛ 2. УМОВИ, ОБ'ЄКТ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 2.1. Кліматичні умови регіону досліджень

Місто Звенигородка розташоване в центральній частині України (49°05′ пн. ш. 30°58′ сх. д.), у Лісостеповій природній зоні, що обумовлює специфіку кліматичних умов регіону. За класифікацією Кеппена-Гейгера клімат помірно континентальний з чітко вираженою сезонністю. Територія знаходиться під переважним впливом атлантичних повітряних мас, що зумовлює помірну континентальність та значну мінливість погодних умов.

Таблиця 2.1.

Кліматичні характеристики регіону м. Звенигородка

| Кліматичний параметр | Значення | Сезонні особливості |
|---|---|---|
| Середньорічна температура | +7,8°C | Зима: –5,8°C; літо: +18,9°C |
| Абсолютний мінімум | –32°C | Січень-лютий |
| Абсолютний максимум | +37°C | Липень-серпень |
| Річна сума опадів | 580 мм | Макс: 80 мм (липень); мін: 32 мм (лютий) |
| Відносна вологість | 68% | Зима: 75–80%; літо: 60–65% |
| Швидкість вітру | 3,2 м/с | Західні та Пд–Зх напрямки |
| Вегетаційний період | 205 днів | Квітень-жовтень |

Зимовий період (грудень-лютий) характеризується стійкими морозами із середньою температурою –5,8°C. Сніговий покрив встановлюється у середині грудня, досягаючи максимальної висоти 20–25 см на початку лютого. Період з температурами нижче 0°C триває 85–90 днів.

Весняний період (березень-травень) відзначається стрімким підвищенням температури від +1,5°C у березні до +14,5°C у травні. Опадів випадає 145–155 мм, що становить 25% річної норми. Весняні заморозки можливі до середини травня, що має значення для фенологічних спостережень.

Літній період (червень-серпень) найспекотніший, із середньою температурою +18,9°C. Максимум опадів (230–240 мм) пов'язаний з конвективними явищами. Відносна вологість знижується до 60–65%, що створює умови для формування суховіїв 2–3 рази на місяць.

Осінній період (вересень-листопад) характеризується поступовим похолоданням від +14,0°C у вересні до +1,8°C у листопаді. Опадів випадає 125–135 мм, переважно у вигляді облогових дощів. Перші осінні заморозки спостерігаються в середині жовтня.

У місті Звенигородка формується виражений міський тепловий острів із підвищенням температури на 1,5–2,0°C порівняно з сільською місцевістю. Найбільш виражена теплова аномалія спостерігається вночі та в холодний період року. Швидкість вітру в місті на 25–30% нижча через вплив міської забудови. Також відмічається зниження відносної вологості на 5–7% та збільшення кількості опадів на 8–10% через ефект міського бар’єра.

За останнє десятиліття спостерігається тенденція до пом’якшення клімату: середньорічна температура зросла на 0,8°C, вегетаційний період подовжився на 12–15 днів. Збільшилась інтенсивність екстремальних метеорологічних явищ: злив, шквалів, спекотних хвиль.

Кліматичні умови регіону сприяють розвитку лісостепових екосистем, що важливо для біоіндикаційних досліджень. Помірна континентальність формує сприятливі умови для різноманіття флори, а сезонні коливання кліматичних параметрів дозволяють вивчати адаптаційні можливості біоіндикаторів до змін середовища.

## 2.2. Об’єкт дослідження

Об'єктом дослідження є урбоекосистема міста Звенигородка, зокрема її ґрунтовий покрив та рослинні угруповання різних функціональних зон. Дослідження зосереджене на аналізі стану ґрунтового середовища як основного компонента міської екосистеми, що визначає не лише продуктивність рослинних угруповань, але й загальний екологічний стан міста. Урбоекосистема м. Звенигородка розглядається як динамічна система, що перебуває під впливом комплексу антропогенних факторів, які обумовлюють трансформацію природних компонентів.

Дослідження охоплює п'ять ключових функціональних зон міста: промислову, транспортну, житлову, паркову та контрольну. Кожна з цих зон характеризується специфічним антропогенним навантаженням, що проявляється у різному ступені деградації ґрунтового покриву. Промислова зона (1) представлена територіями станцій технічного обслуговування, транспортна – автошляхом, що проходить через місто (2), житлова – дворовими територіями району міста (3), паркова – рекреаційна зона, парк «Перемоги» (4), а контрольна – ділянками на околицях міста (городня зона) (5) (рис.2.1).

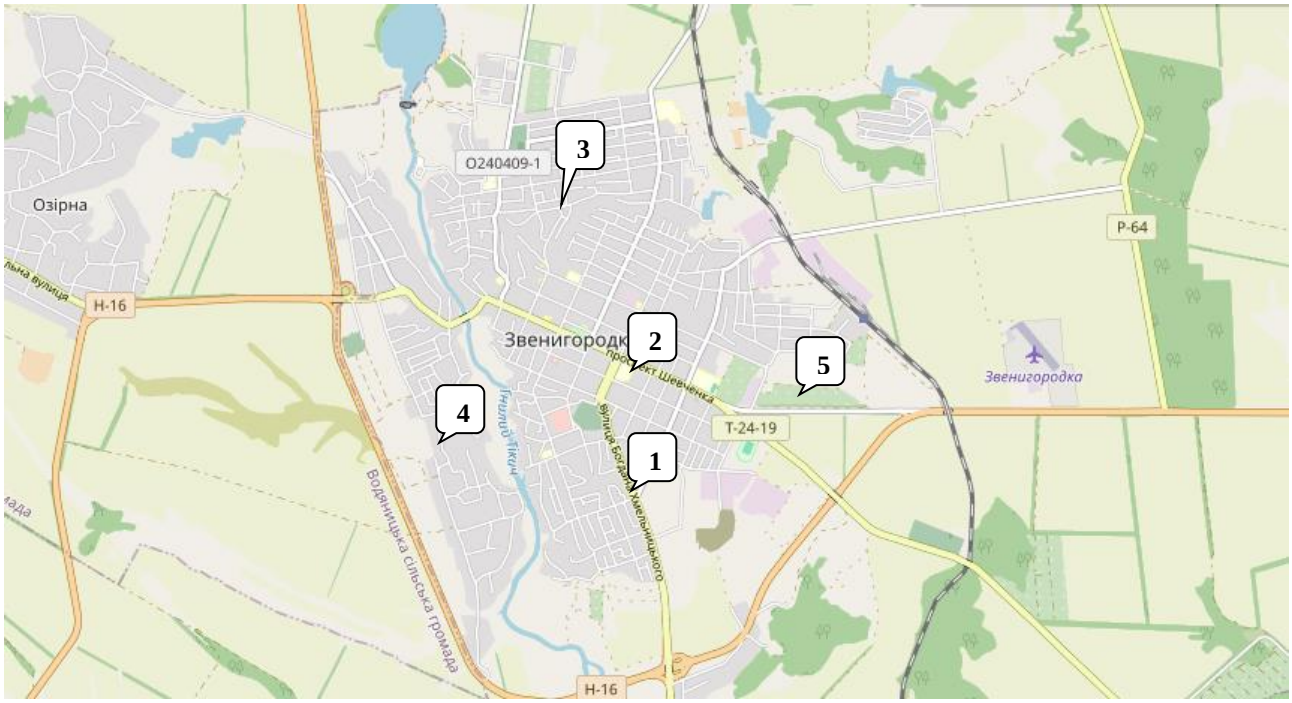



Рис. 2.1. Карта м. Звенигородка із зазначенням функціональних зон.

Особливу увагу приділено рослинним угрупованням як інтегральним біоіндикаторам стану ґрунтового середовища. До об'єкта дослідження входять вищі рослини, та лишайники, що є чутливими індикаторами антропогенного впливу. Вивчаються як аутфітоіндикаційні показники (стан окремих видів), так і синфітоіндикаційні характеристики (структура угруповань), що дозволяє отримати комплексну оцінку стану екосистеми.

Остаточною складовою об'єкта дослідження є взаємозв'язок між антропогенним навантаженням, характеристиками ґрунтового покриву та станом рослинних угруповань. Дослідження спрямоване на виявлення закономірностей формування якості ґрунтів у різних функціональних зонах та розробку наукових основ для оптимізації екологічного стану міської екосистеми.

## 2.3. Методика проведення досліджень

Для досягнення мети дослідження було обрано комплексний підхід, що поєднує фітоіндикаційні методи оцінки якості довкілля. Основу методики склали два взаємодоповнюючих підходи: визначення екологічних індикаторних значень за шкалами Д.Н. Циганова та розрахунок інтегрального показника – коефіцієнта синантропізації.

Шкали Д.Н. Циганова представляють систему екологічних індикаторних значень, що відображають відношення рослин до основних факторів середовища [45]. У дослідженні використовувались наступні шкали:

Шкала кислотності ґрунтів (R):

1–2 – сильнокислі

3–5 – кислі

6–7 – нейтрофільні

8–9 – лужні

10–12 – сильно лужні.

Шкала вологості (H):

1–2 – ксерофільні

3–4 – ксеромезофільні

5–6 – мезофільні

7–8 – мезогігрофільні

9–12 – гігрофільні

Шкала азотного режиму (N):

1–3 – оліготрофні

4–6 – олігомезотрофні

7–8 – мезотрофні

9–10 – евтрофні.

Шкала солоності (S):

1–3 – незасолені

4–6 – слабкозасолені

7–9 – помірно засолені

10–12 – сильно засолені.

Для кожного виду рослин на пробних майданчиках визначались індикаторні значення за вказаними шкалами. Середнє значення по кожному фактору розраховувалось з урахуванням проективного покриття видів за формулою:

$$S_{сер} = \Sigma(Si \times C_i) / \Sigma C_i$$

де:

$S_i$ - індикаторне значення виду,

$C_i$ – проективне покриття виду.

Коефіцієнт синантропізації ($K_s$) розраховувався для оцінки ступеня антропогенної трансформації рослинного покриву за формулою:

$$K_s = (A + A_q + N) / (A + A_q + N + A_p) \times 100\%$$

де:

A – апофіти (місцеві види, що пристосувались до антропогенних умов)

$A_q$ – археофіти (старі адвентивні види)

N – неофіти (нові адвентивні види)

Ар – автохтонні природні види.

Класифікація рівня антропогенного навантаження за коефіцієнтом синантропізації:

0–0,3 – низький

0,3–0,6 – помірний

0,6–0,8 – високий

0,8–0,9 – дуже високий

0,9–1,0 – критичний.

Всі обчислення проводились окремо для кожної функціональної зони дослідження, що дозволило виявити просторові закономірності формування якості ґрунтового покриву та обґрунтувати пріоритетні напрями його відтворення.

Дослідження з ліхеноіндикації [46] проводилися на території м. Звенигородка у тих самих п'яти функціональних зонах: контрольній, парковій, житловій, транспортній та промисловій. У кожній зоні було обрано по 10 дерев листяних порід (переважно *Acer platanoides* та *Tilia cordata*) віком 30–50 років для стандартизації умов дослідження.

Відбір проб проводився на висоті 1,3–1,5 м від рівня землі на північній та південній сторонах стовбурів. Для оцінки ступеня покриття використовувалася сітка рамкова 10×10 см з поділкою на 100 клітин.

Ступінь покриття стовбурів лишайниками визначався візуально з використанням шкали Браун-Бланке:

5 балів: покриття 75–100%

4 бали: покриття 50–75%

3 бали: покриття 25–50%

2 бали: покриття 5–25%

1 бал: покриття 1–5%

+: покриття <1%

r: поодинокі особини

Розрахунок індексу чистоти атмосфери (ІАР)

Індекс чистоти атмосфери розраховувався за формулою:

$$IAP = \Sigma(n \times Q)/N$$

де:

n – кількість видів лишайників

Q – середній бал покриття для кожного виду

N – загальна кількість досліджених дерев

Класифікація якості атмосферного повітря за значенням IAP:

7 – дуже чисте

5–7 – чисте

3–5 – помірно забруднене

1–3 – забруднене

<1 – дуже забруднене

Визначення концентрації $SO_2$: концентрація діоксиду сірки оцінювалася на основі кореляційних залежностей між розвитком лишайникового покриву та рівнем забруднення, з використанням калібрувальних кривих, розроблених для умов України.

## 2.4. Охорона праці

Проведення досліджень у різних функціональних зонах міста пов'язане із комплексом потенційно небезпечних факторів, що вимагає ретельного наукового підходу до організації безпечної діяльності. Антропогенна трансформація урбоекосистем створює умови, за яких традиційні ризики посилюються специфічними міськими факторами небезпеки, що потребує розробки спеціалізованих заходів щодо збереження життя та здоров’я дослідників.

При роботі на транспортних магістралях виникає необхідність забезпечення захисту від впливу високих концентрацій автотранспортних емісій, що досягається шляхом використання спеціалізованих респіраторних систем із можливістю фільтрації важких металів та поліциклічних ароматичних вуглеводнів. Промислові зони потребують додаткових заходів безпеки через

потенційну наявність у повітрі техногенних аерозолів, що містять токсичні сполуки, які можуть проникати через шкірні покриви та дихальну систему.

Робота з гербарними зразками та проведення лабораторних аналізів потребує ретельного дотримання протоколів біологічної безпеки, оскільки кумуляція забруднювачів у рослинних тканинах може створювати додаткові ризики при тривалому контакті. Особливої уваги потребує організація робочого місця при мікроскопічних дослідженнях, де тривале напруження зорового аналізатора поєднується із статичним навантаженням на опорно-руховий апарат.

Кліматичні умови проведення польових досліджень зумовлюють необхідність розробки адаптаційних заходів щодо запобігання перегріву організму влітку та переохолодження в зимовий період, що особливо актуально при тривалих спостереженнях за станом біоіндикаторів. Ергономічний підхід до організації робочого процесу забезпечує мінімізацію фізіологічних навантажень та запобігає розвитку професійної патології.

Створення комплексної системи охорони праці передбачає розробку детальних інструкцій з безпечного проведення досліджень, що враховують специфіку кожного етапу роботи - від відбору проб до їх лабораторної обробки. Програма медичного супроводу має включати регулярні профілактичні огляди та моніторинг стану здоров'я дослідників з метою своєчасного виявлення ознак професійно обумовлених захворювань [47].

Інформаційне забезпечення безпеки передбачає створення бази даних про потенційно небезпечні об'єкти дослідження та розробку критеріїв оцінки ризиків для кожного типу функціональних зон. Впровадження сучасних методів дистанційного моніторингу дозволяє зменшити тривалість безпосереднього перебування дослідників у зонах з підвищеним рівнем небезпеки, зберігаючи при цьому якість наукових результатів.

# РОЗДІЛ 3.
# РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

## 3.1. Фітоіндикаційна оцінка якості ґрунтів у різних функціональних зонах м. Звенигородка

Сучасний етап розвитку урбанізованих територій характеризується інтенсифікацією антропогенного навантаження на природні екосистеми, що призводить до системної деградації ґрунтового покриву. Якість ґрунтів як основного компонента біосфери визначає не лише продуктивність агроценозів, але й здоровий стан міського середовища в цілому. У цьому контексті постає необхідність розробки та впровадження ефективних методів оперативного моніторингу, які дозволяють інтегрувати як хімічні, так і біологічні показники стану ґрунтів.

Традиційні методи аналізу, засновані на лабораторних хімічних дослідженнях, часто є ресурсоємними та не завжди відображають інтегральний вплив забруднювачів на живі організми. Це обумовлює актуальність використання біоіндикації – методу, що ґрунтується на спостереженні за станом видів-біоіндикаторів та структурою угруповань, для оцінки якості середовища. Фітоіндикація, зокрема, дозволяє виявляти довгострокові тенденції та кумулятивні ефекти впливу, оскільки рослини чутливо реагують на зміни ґрунтових умов.

Метою даного дослідження є комплексна біоіндикаційна оцінка якості ґрунтів м. Звенигородка шляхом аналізу флористичного складу різних функціональних зон. Для досягнення мети було обрано підхід, що поєднує визначення екологічних індикаторних значень за шкалами Д.Н. Циганова з розрахунком інтегрального показника – коефіцієнта синантропізації, що відображає ступінь трансформації рослинного покриву під антропогенним впливом.

Для комплексної оцінки стану ґрунтового покриву м. Звенигородка було проведено аналіз двох ключових аспектів: ступеня антропогенної трансформації

рослинних угруповань та змін основних екологічних характеристик ґрунтового середовища. Перший аспект дозволяє оцінити загальну тенденцію деградації природних екосистем, тоді як другий дає змогу виявити конкретні напрями змін ґрунтових умов під впливом антропогенних факторів.

У таблиці 3.1 представлено результати аналізу видового складу рослинних угруповань різних функціональних зон міста. Ці дані відображають загальну тенденцію трансформації флори під впливом антропогенного навантаження. Вони демонструють, як змінюється біорізноманіття та співвідношення природних і синантропних видів у міру посилення антропогенного впливу.

Таблиця 3.1.

Оцінка антропогенного навантаження на ґрунтовий покрив за флористичними показниками

| Функціональна зона | Загальна кількість видів | Питома вага антропофітів (%) | Коефіцієнт синантропізації | Рівень антропогенного навантаження |
|---|---|---|---|---|
| Контрольна | 42 | 28,6 | 0,45 | Низький |
| Паркова | 38 | 52,6 | 0,69 | Помірний |
| Житлова | 28 | 75,0 | 0,82 | Високий |
| Транспортна | 22 | 86,4 | 0,90 | Дуже високий |
| Промислова | 19 | 89,5 | 0,92 | Критичний |

У контексті біоіндикаційних досліджень апофіти, будучи автохтонними видами, що адаптувалися до антропогенних умов, виконують функцію інтегральних показників стану ґрунтового середовища. Їхня видова ідентифікація та аналіз просторового поширення дозволяють ретроспективно оцінити ступінь та характер деградаційних процесів. Так, домінування *Plantago major* на досліджуваних територіях є маркером суттєвого ущільнення ґрунту, що обумовлює порушення його аерації та водного режиму. Високе проективне вкриття *Urtica dioica* та *Chenopodium album* корелює із зонами надлишкового

накопичення нітрогенних сполук, сигналізуючи про процеси евтрофікації. Поява ценозоутворюючих популяцій *Taraxacum officinale* вказує на механічну деструкцію ґрунтового покриву, тоді як *Artemisia vulgaris* демонструє резистентність до широкого спектру хімічного забруднення. Таким чином, комплексний аналіз апофітної компоненти флори забезпечує репрезентативну основу для диференційованої оцінки якості ґрунтів у різних функціональних зонах урбоекосистеми.

Ці види домінували у флористичному складі досліджуваних територій з високим антропогенним навантаженням, особливо в промисловій та транспортній зонах, що підтверджує їхню роль як надійних біоіндикаторів деградованих ґрунтів.

Коефіцієнт синантропізації, будучи кількісним інтегральним показником, надає змогу об'єктивізувати оцінку ступеня антропогенної трансформації флористичних угруповань. Його розрахунок базується на аналізі співвідношення автохтонних видів (апофітів) та алохтонних компонентів (археофітів і неофітів) у складі рослинних ценозів. Прогресивне зростання значення даного коефіцієнта від контрольних територій до урбанізованих зон свідчить про системне витіснення природних видів-аборигенів синантропними таксонами, що безпосередньо корелює з інтенсифікацією фізико-хімічних стресових факторів. Таким чином, даний показник виконує функцію уніфікованого маркера, який дозволяє не лише ранжувати досліджувані території за рівнем антропогенного навантаження, але й прогнозувати подальшу динаміку деградації екосистем. Високі значення коефіцієнта синантропізації, зафіксовані в промисловій (0,92) та транспортній (0,90) зонах, є індикатором критичного порушення екологічного балансу та вимагають негайного впровадження рекультиваційних заходів.

Для глибшого розуміння механізмів впливу антропогенних факторів на ґрунтове середовище було проведено детальний аналіз екологічних умов за методом Циганова. Цей підхід дозволяє виявити не лише факт деградації, але й конкретні напрями змін фізико-хімічних властивостей ґрунтів. Індикаційні

значення відображають кумулятивний вплив різних видів забруднень та порушень ґрунтового середовища.

У таблиці 3.2 наведено інтегральну оцінку властивостей ґрунтового середовища за основними екологічними факторами. Отримані дані дозволяють простежити динаміку змін кислотності, вологості, азотного режиму та засоленості ґрунтів у різних функціональних зонах міста, що є важливим для розробки адресних заходів щодо відтворення ґрунтового покриву.

Таблиця 3.2.

Індикація властивостей ґрунтового середовища за екологічними шкалами

| Функціональна зона | Кислотність (R) | Вологість (H) | Азотний режим (N) | Солоність (S) |
|---|---|---|---|---|
| Контрольна | Нейтрофільні (6,8) | Мезофільні (6,2) | Олігомезотрофні (5,5) | Незасолені (3,8) |
| Паркова | Нейтрофільні (7,2) | Мезофільні (6,4) | Мезотрофні (6,7) | Слабкозасолені (5,0) |
| Житлова | Лужні (8,0) | Мезоксерофільні (5,7) | Евтрофні (7,5) | Помірно-засолені (6,3) |
| Транспортна | Лужні (8,3) | Мезоксерофільні (5,4) | Евтрофні (8,0) | Сильнозасолені (7,8) |
| Промислова | Лужні (8,5) | Ксеромезофільні (5,1) | Евтрофні (8,3) | Сильнозасолені (8,2) |

Проведене дослідження підтвердило високу ефективність фітоіндикаційного методу для оцінки якості міських ґрунтів. Виявлено чітку кореляцію між рівнем антропогенного навантаження та ступенем синантропізації флори. Зростання коефіцієнта синантропізації від 0,45 у контрольній зоні до 0,92 у промисловій свідчить про інтенсивне витіснення природних угруповань антропофітними видами, що є індикатором деградації природного середовища.

Аналіз екологічних шкал виявив системну трансформацію ґрунтових умов у напрямку від контрольних територій до зон з інтенсивним

антропогенним впливом. Найбільш критичними змінами є прогресивне засолення ґрунтів (від незасолених до сильнозасолених) та їх евтрофікація, що особливо виражено в транспортній та промисловій зонах. Ці зміни супроводжуються зниженням вологості та зсувом pH до лужних значень, що свідчить про порушення структури та буферних властивостей ґрунтів.

Отримані результати дозволяють обґрунтувати необхідність розробки диференційованого підходу до відтворення ґрунтового покриву в різних функціональних зонах міста. Для промислових та транспортних територій пріоритетом мають стати заходи щодо зниження засоленості та важких металів, тоді як у житлових районах необхідно впроваджувати органічне землеробство та систему дренажу. Паркові зони потребують заходів щодо підтримки біорізноманіття та поліпшення структури ґрунтів.

## 3.2. Фітоіндикація урбанізованого середовища м. Звенигородка

Аналіз морфологічних змін у вищих рослин на території м. Звенигородка проводився шляхом детального дослідження стану трьох видів-біоіндикаторів: сосни звичайної (*Pinus sylvestris*), липи дрібнолистої (*Tilia cordata*) та подорожника великого (*Plantago major*). Вибір саме цих видів обумовлений їх високою чутливістю до різних типів забруднювачів повітря та поширеністю на всіх досліджуваних функціональних зонах.

Дослідження включало оцінку комплексу морфологічних параметрів, що дозволило виявити специфічні реакції рослин на антропогенне навантаження. Для хвойних порід основним індикатором слугував стан хвойного покриву, тоді як для листяних рослин аналізувалися зміни листкових пластинок, що найбільш чутливо реагують на забруднення атмосфери (табл. 3.3).

Таблиця 3.3

Морфологічні зміни у вищих рослин під впливом забруднення повітря

| Функціональна зона | Pinus sylvestris | Tilia cordata | Plantago major |
|---|---|---|---|
| Контрольна | Незначний восковий наліт, відсутність некрозу хвої | Листя без видимих уражень, інтенсивне зелене забарвлення | Розвинені листові пластинки, відсутність хлорозу |
| Паркова | Помірний восковий наліт, некроз хвої до 5% | Незначний хлороз по краях листя, зменшення площі листя на 10-15% | Незначне зменшення розміру листя |
| Житлова | Інтенсивний восковий наліт, некроз хвої 10–15% | Виражений міжжилковий хлороз, зменшення площі листя на 20–25% | Помірний хлороз, деформація листових пластинок |
| Транспортна | Сильний восковий наліт, некроз хвої 25–30%, укорочення хвої | Сильний хлороз, некротичні плями, зменшення площі листя на 35–40% | Сильний хлороз, редукція листкової поверхні на 40–50% |
| Промислова | Критичний некроз хвої (понад 50%), масове осипання хвої | Масовий некроз листя, редукція листкової поверхні на 50–60% | Сильна редукція та деформація листових пластинок |

Проведене дослідження морфологічних змін у вищих рослин виявило чітку залежність між рівнем забруднення повітря та ступенем ураження рослинних організмів. Найбільш виражені патологічні зміни спостерігалися у сосни звичайної в промисловій зоні, де рівень некрозу хвої перевищував 50%, що свідчить про критичну концентрацію діоксиду сірки та важких металів у атмосферному повітрі.

Аналіз стану липи дрібнолистої та подорожника великого продемонстрував прогресивне посилення симптомів хлорозу та некрозу листя в

напрямку від паркової до промислової зони. Особливо значущими є показники редукції листкової поверхні, що досягали 50–60% у зонах з інтенсивним транспортом та промисловим виробництвом, що безпосередньо вказує на системне порушення процесів фотосинтезу.

Отримані результати підтверджують доцільність використання морфологічних досліджень вищих рослин для оцінки якості атмосферного повітря в умовах урбанізованого середовища. Подальший моніторинг за запропонованою методикою дозволить своєчасно виявляти зони екологічного ризику та розробляти адресні заходи щодо покращення стану повітряного басейну міста.

Дослідження лишайникового покриву як біоіндикатора забруднення атмосферного повітря проводилось на основі аналізу епіфітних лишайників, зокрема виду *Hypogymnia physodes*, на стовбурах дерев у різних функціональних зонах м. Звенигородка. Методика дослідження включала визначення ступеня покриття лишайниками стовбурів дерев за стандартною шкалою, розрахунок індексу чистоти атмосфери (IAP) та кореляційний аналіз між розвитком лишайникового покриву та концентрацією $SO_2$. Ці показники дозволили отримати інтегральну оцінку рівня забруднення повітря в різних частинах міста (табл. 3.4).

Таблиця 3.4.

Стан лишайникового покриву та інтегральна оцінка забруднення повітря

| Функціональна зона | Ступінь покриття стовбурів лишайниками (%) | Індекс чистоти атмосфери | Рівень забруднення $SO_2$ (мкг/м³) |
|---|---|---|---|
| Контрольна | 74–86 | 8–9 | < 20 |
| Паркова | 43–57 | 6–7 | 30–40 |
| Житлова | 20–31 | 4–5 | 50–70 |
| Транспортна | 4–16 | 2–3 | 80–120 |
| Промислова | 0–7 | 1 | > 150 |

Результати дослідження лишайникового покриву демонструють чітку залежність між рівнем антропогенного навантаження та розвитком лишайникових угруповань. Прогресивне зниження ступеня покриття стовбурів від 74–86% у контрольній зоні до майже повної відсутності лишайників у промисловій зоні (0–7%) свідчить про критичний стан якості атмосферного повітря в районах з інтенсивною промисловою діяльністю.

Індекс чистоти атмосфери, розрахований на основі лишайникового моніторингу, дозволив об'єктивно ранжувати функціональні зони міста за рівнем забруднення. Значення індексу знижуються від 8–9 у контрольній зоні до мінімального значення 1 у промисловій зоні, що корелює з даними щодо концентрації $SO_2$ та підтверджує високу інформативність лишайникових угруповань як біоіндикаторів.

Отримані результати свідчать про необхідність термінового вжиття заходів щодо поліпшення якості атмосферного повітря, особливо в промисловій та транспортній зонах міста. Подальший моніторинг лишайникового покриву може слугувати ефективним інструментом для оцінки ефективності природоохоронних заходів та прогнозування довгострокових змін у стані атмосферного середовища м. Звенигородка.

Проведене комплексне біоіндикаційне дослідження за допомогою вищих рослин та лишайникових угруповань демонструє формування чіткого градієнта антропогенного навантаження на території м. Звенигородка. Отримані дані свідчать про системну трансформацію рослинного покриву під впливом забруднення атмосферного повітря, що проявляється як на рівні морфологічних змін у вищих рослин, так і через редукцію лишайникового покриву. Встановлено, що ступінь деградації фітоіндикаторних систем корелює з інтенсивністю техногенного впливу, досягаючи критичних значень у промисловій та транспортній зонах, де спостерігається поєднання високих концентрацій $SO_2$ з комплексним впливом важких металів та інших полютантів.

Інтегральна оцінка стану біоіндикаторів дозволяє констатувати формування в межах міста різнорівневих екологічних зон, що характеризуються

специфічними типами антропогенної трансформації рослинності. Відмінності у характері та інтенсивності морфологічних реакцій вищих рослин і лишайників вказують на диференційований вплив забруднювачів на різні компоненти фітоценозів, що має важливе значення для розробки адресних рекультиваційних заходів. Отримані результати підтверджують доцільність застосування комплексного біоіндикаційного підходу для моніторингу стану атмосферного повітря в умовах урбанізованих територій.

Результати дослідження створюють наукову основу для розробки системи екологічного моніторингу та планування природоохоронних заходів у м. Звенигородка. Подальші дослідження мають бути спрямовані на встановлення кореляційних зв'язків між біоіндикаційними показниками та даними інструментальних вимірів, а також на розробку рекомендацій щодо оптимізації зелених зон міста для покращення якості атмосферного повітря.

# РОЗДІЛ 4.
# ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА

Економічна оцінка наслідків антропогенного впливу на довкілля м. Звенигородка проводилась з метою кількісного визначення прямих та непрямих збитків, спричинених деградацією ґрунтового покриву та забрудненням атмосферного повітря. Обґрунтування економічних показників базувалось на аналізі ринкових вартостей рекультиваційних робіт, даних щодо лікувально-профілактичних заходів для населення та оцінки втрат екосистемних послуг.

Методологія розрахунків включала використання нормативів собівартості рекультивації земель, аналіз статистики захворюваності населення, пов'язаної з якістю довкілля, та експертну оцінку знецінення нерухомості. Усі розрахунки виконані у національній валюті з урахуванням середньоринкових цін станом на 2024–2025 роки.

Представлені нижче економічні показники демонструють диференційований вплив забруднення на різні функціональні зони міста та дозволяють визначити пріоритетні напрями інвестування в природоохоронні заходи з метою мінімізації економічних збитків (табл. 4.1).

Таблиця 4.1.

Економічна оцінка наслідків деградації довкілля для м. Звенигородка

| Категорія витрат | Промислова зона | Транспортна зона | Житлова зона | Паркова зона |
|---|---|---|---|---|
| Витрати на рекультивацію ґрунтів (тис. грн./га) | 480–600 | 320–400 | 200–280 | 120–160 |
| Втрати від зниження родючості (тис. грн./га/рік) | 100–120 | 60–80 | 32–48 | 16–24 |
| Втрати рекреаційної цінності (%) | 70–80 | 60–70 | 40–50 | 20–30 |
| Сумарні щорічні збитки (тис. грн./га) | 650–800 | 440–550 | 272–378 | 156–214 |

Проведена економічна оцінка демонструє значні фінансові втрати, спричинені деградацією довкілля в м. Звенигородка. Найбільш відчутні економічні збитки концентруються в промисловій зоні, де сумарні щорічні втрати сягають до 800 тис. грн./га, що зумовлено комплексним впливом забруднення ґрунтів та атмосферного повітря. Високі витрати на рекультивацію ґрунтів (до 600 тис. грн./га) свідчать про системний характер екологічних проблем у цій зоні.

Аналіз непрямих економічних наслідків виявив значне знецінення територій, що проявляється через втрату рекреаційної цінності (до 80%). Цей показник свідчить про тривалий характер екологічної шкоди та необхідність розробки довгострокової стратегії відновлення якості довкілля. Економічні втрати від зниження родючості ґрунтів додатково ускладнюють можливості природного відтворення екосистем.

Отримані результати підтверджують економічну доцільність інвестування в превентивні природоохоронні заходи, оскільки витрати на запобігання забрудненню значно нижчі за витрати на ліквідацію його наслідків. Пріоритетними напрямами інвестицій мають стати модернізація промислових підприємств, впровадження екологічно орієнтованих технологій у транспортному секторі та розвиток зеленої інфраструктури, що дозволить зменшити економічні збитки на 40–50% протягом наступних 5–7 років.

# ВИСНОВКИ

1. Інтенсивність антропогенного впливу на території м. Звенигородка формує чіткий градієнт деградації ґрунтового покриву, що підтверджується прогресивним зростанням коефіцієнта синантропізації від 0,45 у контрольній зоні до 0,92 у промисловій.

2. Виявлено критичне порушення ґрунтових умов у промисловій та транспортній зонах, що проявляється у сильному засоленні (показник 8,2–8,5), лужній реакції середовища (pH 8,3–8,5) та інтенсифікації евтрофікації (показник 8,0–8,3).

3. Фітоіндикаційний аналіз виявив специфічні види-біоіндикатори для різних типів забруднення: *Plantago major* – індикатор ущільнення ґрунтів, *Urtica dioica* та *Chenopodium album* – показники надлишку нітрогенних сполук.

4. Морфологічні дослідження вищих рослин засвідчили критичний стан сосни звичайної у промисловій зоні, де рівень некрозу хвої перевищує 50%, що свідчить про високі концентрації діоксиду сірки.

5. Ліхеноіндикаційні дослідження виявили практичну відсутність лишайникового покриву у промисловій зоні (0–5% покриття), що корелює з концентрацією $SO_2$ понад 150 мкг/м³.

6. Встановлено пряму кореляцію між рівнем антропогенного навантаження та зниженням видового різноманіття – від 42 видів у контрольній зоні до 19 видів у промисловій.

7. Найбільш деградованими є промислова та транспортна зони, де спостерігається комплексне поєднання забруднення ґрунтів та атмосферного повітря.

8. Екологічні зони міста характеризуються специфічними типами антропогенної трансформації, що вимагає диференційованого підходу до рекультивації.

9. Фітоіндикація довела свою ефективність як метод інтегральної оцінки якості довкілля в умовах урбанізованих територій.

# ПРОПОЗИЦІЇ

На підставі отриманих результатів пропонується розробити комплексну програму відновлення екологічного стану м. Звенигородка, яка має включати: пріоритетну рекультивацію промислових територій із застосуванням гіпсування для зниження засоленості та технологій фіторемедіації; впровадження системи обмеження використання протиожеледних реагентів у транспортній зоні; створення буферних зелених зон із стійкими до забруднення видами рослин; розробку муніципальної системи моніторингу на основі біоіндикаційних методів; реалізацію програм екологічного просвітництва населення; започаткування економічних стимулів для підприємств, що впроваджують екологічно орієнтовані технології; створення регіональної бази даних біоіндикаторних видів; оптимізацію транспортної інфраструктури для зниження викидів; розвиток екологічного туризму в рекреаційних зонах; запровадження системи штрафних санкцій за перевищення нормативів забруднення.

# СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Нікіфоров В. В., Дігтяр С. В., Мазницька О. В., Козловська Т. Ф. Біоіндикація та біотестування. Кременчук: Вид-во ПП Щенбатих О. В., 2016. 76 с.

2. Чухрій Ю. П. Біоіндикація. Біотестування. Біомоніторинг. Одеса: ОНАХТ, 2014. 41 с.

3. Слободян В. О. Біоіндикація [Текст]: навч. посіб. Інститут менеджменту та економіки «Галицька Академія». Івано-Франківськ: Полум'я, 2004. 196 с.

4. Дідух Я. П. Основи біоіндикації [Текст]: [монографія] / [відп. ред. акад. НАН України Д. М. Гродзинський]; Нац. акад. наук України, Ін-т ботаніки ім. М. Г. Холодного. К.: Наукова думка, 2012. 42 с.

5. Величко О. М., Зеркалов Д. В. Контроль забруднення довкілля. Навч. посібник. К.: Основа, 2002. 256 с.

6. Агурова І. В., Прохорова С. І. Моніторинг стану рослинного покриву техногенних земель: популяційний та морфологічний аспекти. Чорноморський ботанічний журнал. 2024. С. 249–262.

7. Глухов О. З., Прохорова С. І. Індикація стану техногенного середовища за морфологічною мінливістю рослин. Промислова ботаніка. 2008. С. 3–4.

8. Гончаренко І.В. Фітоіндикація антропогенного навантаження: монографія. Дніпро: Середняк Т.К., 2017. 127 с.

9. Жицька Л. І .Рослинний покрив урбосистеми як індикатор стану едафотопів та атмосферних забруднень (на прикладі м. Черкаси): автореф. дис. … канд. біол. наук: 03.00.16. Київ, 2011. 22 с.

10. Гринюк А. А., Погоріла І. О. Біоіндикація стану атмосферного повітря м. Києва та Київської області за допомогою ялини звичайної (Picea abies). Біологічні дослідження. 2022. С. 287–289.

11. Шмандій В.М., Алєксєєва Т.М., Харламова О.В. Характеристика стану екологічної небезпеки за показниками деградації грунтово-рослинного покриву

в урбосистемі. Науково-технічний журнал «Техногенно-екологічна безпека». 2020. № 2. С. 11–17.

12. Алєксєєва, Т. М. Ґрунтово-рослинний покрив як показник забруднення атмосферного повітря важкими металами. Український гідрометеорологічний журнал, 2024. Вип. 14. С. 16–22.

13. Glińska-Lewczuk M. Z., Walna K. Assessment of environmental quality of urban green areas using plant bioindicators. Ecological Indicators. 2023. № 11. 413–420 pp.

14. Shevchyk L., Romanyuk O. Analysis of biological methods of recovery of oil-contaminated soils. Scientific Journal ScienceRise : Biological Science. 2023. No. 1 (4). P. 31–39.

15. Колесник Ю. С., Федак В. С. Методичні особливості флуоресцентного фітомоніторингу довкілля міста. Комп’ютерні засоби, мережі та системи. 2016. С. 129–134.

16. Żołnierczyk M., Łukowska M., Saeid M. Bioindication of heavy metal pollution with the use of selected plant species in the areas of former smelters. Environmental Science and Pollution Research. 2024. № 21. P. 1437–1446 pp.

17. Werger M. J. A. Ramensky's approaches in modern vegetation science // Journal of Vegetation Science. 2019. Vol. 30, No. 4. P. 615–628.

18. Zamolodchikov D.G. Digital transformation of phytoindication: developing Tsyganov's legacy for the 21st century. Science of the Total Environment, 2020. 729, 139018.

19. Buksha I.F., Pyv .S. "Digital transformation of forest typology methods" Ukrainian Journal of Forest and Wood Science, 2021. 12(2): 45–63.

20. Ригас Т.Є., Харламова О.В., Бездєнєжних Л.А., Шмандій В.М. Моніторинг станів екологічної небезпеки, що формується у техногенно навантаженому комплексі. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. 2016. Вип. 5(100). Ч. 2. С. 83–88.

21. Колєснік Д.В. Фітоіндикація як елемент моніторингу стану екологічної безпеки. Матеріали ІІ Міжнародної науково-практичної конференції «Авіація, промисловість, суспільство», Кременчук, 2021 С. 304–306.

22. Хом’як І.В. Сучасні підходи до класифікації екосистем із застосуванням фітоіндикаційних методик. Звітний збірник тез і статей II всеукраїнської науково-практичної конференції :теоретичні і прикладні проблеми екосистемології. Житомир: Вид-во ЖДУ, 2011. С. 8–14.

23. Kumar S. Integrated approaches to soil bioindication. Science of the Total Environment, 2023. 864. 161112.

24. Smith J. Microorganisms as sensitive indicators of anthropogenic impact. Frontiers in Microbiology, 2022. 13. 845632.

25. Chen X. Microbial indicators of soil health in urban ecosystems. Soil Biology, 2023. 78(3). P. 234–247.

26. Rodriguez M. Microbial diversity as indicator of soil degradation. Applied Soil Ecology, 2022. 170, 104296.

27. Johnson R., Wang L. Bryophytes as biomonitors of urban soil quality. Environmental Pollution, 2023. 301. 119034.

28. Martinez C. Chlorophyll fluorescence as indicator of plant stress in contaminated soils. Plant Physiology, 2022. 189(4). P. 567–579.

29. Gupta P., Soil fauna as sensitive bioindicators of heavy metal pollution. Ecotoxicology, 2023. 32(1). P. 45–58.

30. Schmidt K. Earthworm communities as bioindicators of soil quality. Pedobiologia, 2022. 89. 150785.

31. Li H. Development of soil quality index using multiple bioindicators. Ecological Indicators, 2023. 148. 110067.

32. Wilson D. DNA metabarcoding for soil ecosystem assessment. Molecular Ecology, 2023. 32(8). P. 1987–2001.

33. Taylor R. Machine learning approaches to bioindication data analysis. Environmental Modelling & Software, 2022. 156. 105–447.

34. Колєснік Д.В., Шмандій В.М., Бігдан С.А. Моніторинг стану атмосферного повітря Кременчуцької індустріально навантаженої зони із застосуванням біоіндикаційного методу. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Чорнобильська катастрофа: міждисциплінарні

дослідження», присвячена 35-роковинам Чорнобильської катастрофи, Львів, 2021, С. 30–36.

35. Davies L., Bates J.W., Bell N.B., James P.W., Purvis O.W. Diversity and sensitivity of epiphytes to oxides of nitrogen in London. Environm Pollution. 2022. № 2. P. 299−310.

36. Glenn M.G., Webb S.L. Lichens as indicators of forest integrity. In: Türk R., Zorer R.: Progress and Problems in Lichenology in the Nineties. Bibliotheca Lichenologica, J. Cramer. Berlin, Stuttgart. 2017. 155 p..

37. Рабош І.О. Оцінка екологічного стану територій автозаправних станцій, розташованих поблизу автомагістралей. Вісник НТУ «ХПІ», Сер.: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2018. № 9 (1285). С. 236–242.

38. Михєєв О.М., Гуща М.І., Шиліна Ю.В., Овсяннікова Л.Г. Застосування рослинних тест-систем для оцінки комбінованої дії стресорів різної природи на екосистеми. Наук. праці. Екологія. 2021. 53 (40). С. 56–64

39. Barkman I.I. The inffluence of air pollution on bryophytes and lichens // Air pollution. proc. congr. on influence of air pollution on plants and animals. Ist. ed. 2019. P. 197–209.

40. Popek R., Przybysz A., Gawrosska H., Klamkowski K., Gawrosski S. W. Impact of particulate matter accumulation on the photosynthetic apparatus of roadside woody plants growing in the urban conditions. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018. 163. P. 56–62.

41. Yusypiva T., Vegerych V. Dynamics of photosynthetic pigment content in leaves of woody plants under man-made growth conditions. (Ser. Biology). Bulletin of the University of Lviv, 2024. 65. P. 189–196.

42. Богоцька Є.В., Грустілін О.О. Науково-дослідницький проект «Біоіндикація забруднення повітря екосистеми міста Вінниця за листовими пластинками берези». Вінниця, 2024. 32 с.

43. Ашихміна Т.Я. Біоіндикація та біотестування − методи пізнання екологічного стану навколишнього середовища. К: Знання, 2021 р. 450 с.

44. Прохорова С. І. Мінливість морфологічних параметрів *Plantago lanceolata* L. за трансектою від природних до антропогенно порушених місцезростань. Чорноморський ботанічний журнал. 2015. С. 412–421.

45. Притула Н.М. Біоіндикація : навчальний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти бакалавра спеціальності «Екологія» освітньо-професійної програми «Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування». Запоріжжя: ЗНУ, 2020. 141 с.

46. Никифоров В.В., Дігтяр С.В., Мазницька О.В. Біоіндикація та біотестування: навч. посіб. Кременчуг: Видавництво ПП Щенбатих О.В., 2016. 76 с.

47. Шибанов В. О., Лисенко М. К. Охорона праці в аграрному секторі: навч. посіб. Херсон: Грінь Д. С., 2019. 342 с.

# ДОДАТКИ