МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УМАНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет плодоовочівництва, екології та захисту рослин
Кафедра екології та безпеки життєдіяльності

Допущено до захисту
«___» (_____) 2025 р.
Зав. кафедри, к. с.-г. н., доцент
_____Ольга ВАСИЛЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
магістра

ФІТОМОНІТОРИНГ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТРІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОДОРОЖНИКА ВЕЛИКОГО (PLANTAGO MAJOR)

Виконанав: студент 2 курсу, групи 21-м-ек
спеціальності 101 Екологія
освітньо-професійної програми Екологія
Олександр ГРЕБЕНЮК
Керівник : Ольга НІКІТІНА

Умань – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП 3

РОЗДІЛ 1. ЕКОЛОГІЧНІ ОСНОВИ БІОІНДИКАЦІЇ (огляд літератури) 6

1.1 Визначення та класифікація систем моніторингу в оцінці антропогенного впливу на природне середовище 6

1.2 Особливості рослинних угруповань як об'єктів у системі моніторингових досліджень 8

1.3 Використання *Plantago major* L. для фітотестування урбанізованих територій 12

РОЗДІЛ 2. УМОВИ І МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ 15

2.1 Умови проведення досліджень 15

2.2 Характеристика об'єкту досліджень 16

2. 3 Методика проведення досліджень 16

2.4 Охорона праці та безпека виконання наукових досліджень 18

РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ 21

3.1. Аналіз морфометричної мінливості *Plantago major* в умовах антропогенного навантаження 21

3.2. Оцінка інтенсивності перекисного окиснення ліпідів у Plantago major за умов антропогенного впливу 31

РОЗДІЛ 4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ФІТОТЕСТУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ *PLANTAGO MAJOR* В СИСТЕМУ МОНІТОРИНГУ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ 34

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ 38

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 40

ДОДАТКИ 41

ВСТУП

У структурі складної та взаємозалежної системи «рослинні організми – антропогенно трансформоване середовище» простежується не лише односторонній вплив рослинного покриву на умови довкілля, а й потужна зворотна реакція середовища на стан рослин. Атмосферні забруднювачі здатні істотно порушувати функціонування зелених насаджень, зумовлюючи зміни фізіолого-біохімічних процесів, ушкодження листкових пластинок, загальне пригнічення життєдіяльності, а в окремих випадках — повну загибель рослинних особин [1, 2, 3].

Серед рослинних об’єктів особливо зручно застосовувати ценопопуляції *Plantago major* L., оскільки цей вид вирізняється широкою географічною амплітудою, переважно насіннєвим способом відтворення та здатністю формувати характерні риси середовища. Упродовж останніх десятиліть спостерігається зростання наукового інтересу до вирішення екологічних проблем, де рослинні індикаторні види активно використовуються для оцінювання стану природного середовища. Отримані дані відіграють ключову роль у здійсненні біомоніторингу та забезпечують наукову основу для подальшої оцінки екологічних змін.

Актуальність теми.

Урбанізовані території перебувають під постійним впливом техногенних чинників, що призводить до деградації рослинного покриву та погіршення екологічного стану довкілля. Традиційні методи моніторингу є затратними та не завжди забезпечують оперативність оцінки, що зумовлює потребу у використанні біоіндикаційних підходів. *Plantago major* вирізняється високою екологічною пластичністю, чутливістю до забруднення та широким поширенням, що робить його ефективним фітотест-об’єктом для визначення рівня антропогенного навантаження. Дослідження морфометричних і біохімічних показників цього виду дозволяє своєчасно виявляти екологічні порушення та формувати економічно обґрунтовані рішення щодо управління якістю міського довкілля. Саме тому тема роботи є актуальною в умовах

зростання техногенного навантаження та необхідності впровадження доступних і надійних методів екологічного моніторингу.

Об'єкт дослідження – Ценопопуляції *Plantago major* L., що зростають на урбанізованих та лісових територіях з різним рівнем антропогенного навантаження.

Предметом дослідження — Морфометричні та біохімічні показники *Plantago major* L. (зокрема параметри листкової пластини та інтенсивність перекисного окислення ліпідів), які відображають реакцію рослин на екологічні умови та рівень техногенного впливу.

Мета роботи: Оцінити реакцію *Plantago major* L. на різні рівні антропогенного навантаження та обґрунтувати можливість використання цього виду як ефективного фітоіндикатора стану урбанізованих територій.

Завдання роботи

1. Проаналізувати сучасний стан наукових досліджень щодо фітоіндикації та біомоніторингу урбанізованих територій.
2. Охарактеризувати екологічні умови дослідних майданчиків із різним рівнем техногенного навантаження.
3. Провести морфометричний аналіз прегенеративних, генеративних і постгенеративних особин *Plantago major* L.
4. Визначити інтенсивність перекисного окислення ліпідів у рослин як показник стресового стану.
5. Порівняти морфометричні та біохімічні параметри рослин між дослідними ділянками.
6. Оцінити індикаторну цінність *Plantago major* та визначити його придатність для фітотестування урбанізованих територій.

Наукова новизна роботи. Уперше здійснено комплексну оцінку індикаторного потенціалу *Plantago major* L. в умовах різного антропогенного навантаження з одночасним аналізом морфометричних показників та інтенсивності перекисного окиснення ліпідів. Встановлено вікову специфіку реакцій рослин на техногенні стресори та виявлено морфофункціональні

маркери, які найбільш чутливо реагують на зміни екологічного стану урбанізованих територій. Доведено, що поєднання морфометричних та біохімічних індикаторів забезпечує підвищену точність оцінки стану міських екосистем.

Практична цінність роботи. Отримані результати можуть бути використані для створення маловитратних та оперативних методик фітотестування стану урбанізованих територій. Визначені морфометричні та біохімічні показники *Plantago major* можуть слугувати діагностичними критеріями в екологічному моніторингу, системах раннього виявлення деградації міських ландшафтів та оптимізації природоохоронних заходів. Застосування виду як фітоіндикатора дозволяє суттєво знизити витрати на моніторингові дослідження та підвищити їх інформативність у практиці міських екологічних служб.

Методи дослідження. У роботі використано польові, морфометричні та біохімічні методи. Польові дослідження передбачали відбір зразків Plantago major L. на різних типах територій. Морфометричний аналіз включав вимірювання основних параметрів листка та генеративних органів. Біохімічний стан рослин оцінювали за інтенсивністю перекисного окиснення ліпідів. Статистична обробка забезпечила достовірність отриманих результатів.

Апробація результатів роботи Основні положення кваліфікаційної роботи представлялися і обговорювалися на конференції студентських наукових праць Уманського національного університету.

Структура та обсяг дипломної роботи. Загальний обсяг роботи становить 43 сторінки комп’ютерного тексту. Дипломна робота складається з вступу, 4 розділів, висновків та 1 додатку. Список використаних джерел нараховує 40 джерел.

РОЗДІЛ 1
ЕКОЛОГІЧНІ ОСНОВИ БІОІНДИКАЦІЇ (огляд літератури)

1.1. Визначення та класифікація систем моніторингу в оцінці антропогенного впливу на природне середовище

Моніторинг навколишнього природного середовища розглядають як цілісну, організовану систему безперервних спостережень, спрямовану на виявлення, аналіз та прогноз змін у стані довкілля під впливом антропогенних чинників [2, 5].

Залежно від об'єкта спостереження виділяють різні напрями моніторингових досліджень: атмосферний, водний, ґрунтовий, кліматичний, моніторинг рослинності, фауни, стану здоров'я населення тощо [6,7].

За масштабами просторового та часово́го охоплення моніторинг поділяють на локальний, регіональний та глобальний.
За рівнем узагальнення інформації розрізняють такі категорії моніторингових систем:

1. Глобальний моніторинг — охоплює спостереження за планетарними процесами в біосфері, включаючи всі її компоненти, та забезпечує раннє попередження про потенційні екстремальні ситуації.
2. Базовий (фоновий) моніторинг — спрямований на реєстрацію природних змін довкілля за відсутності локального антропогенного впливу.
3. Національний моніторинг — охоплює оцінку стану довкілля в межах держави.
4. Регіональний моніторинг — здійснюється у межах певної території, де природні та антропогенні умови суттєво відрізняються від загальнобіосферного фону.
5. Локальний моніторинг — передбачає оцінку впливу конкретних джерел забруднення.

6. Імпактний моніторинг — проводиться у зонах із підвищеним рівнем екологічної небезпеки, де антропогенні впливи можуть становити загрозу біотичним і абіотичним компонентам середовища [8–10].

Найбільш комплексним різновидом моніторингових систем вважають екологічний моніторинг. Поняття «екологічний моніторинг» було офіційно введене після Стокгольмської конференції 1972 року і охоплює спостереження, аналіз і прогноз змін стану довкілля [11, 12].

Комплексний екологічний моніторинг передбачає організацію систематичних спостережень за станом природних об’єктів з метою оцінки рівнів забруднення та своєчасного виявлення критичних екологічних ситуацій, що можуть загрожувати людському здоров’ю та функціонуванню екосистем.

Біологічний моніторинг є складовою частиною загальної моніторингової системи та оснований на використанні живих організмів для визначення та прогнозу змін, спричинених антропогенними чинниками [6, 13–16].

Його значущість зумовлена кількома чинниками:

- по-перше, він дозволяє оцінювати стан одного з ключових компонентів екосистем — біоти;

– по-друге, чимало змін у довкіллі можуть бути виявлені лише за участю чутливих видів-індикаторів;

- по-третє, біологічні об’єкти забезпечують комплексний аналіз екологічних трансформацій, що недосяжно виключно за хімічними чи геофізичними методами спостережень [8, 9].

Біологічний моніторинг, який охоплює також біоіндикаційні та біотестові дослідження, здебільшого належить до фонового рівня моніторингу. Його основне завдання полягає у проведенні тривалих спостережень за концентраціями забруднювальних речовин у різних природних компонентах на територіях, віддалених від джерел викидів, а також у виявленні глобальних тенденцій змін у біосфері в умовах антропогенного навантаження [17, 18].

1.2. Особливості рослинних угруповань як об’єктів у системі моніторингових досліджень

Залучення живих організмів до системи екологічного моніторингу дає можливість комплексно оцінювати сукупну дію антропогенних чинників на біоту та визначати біологічні ефекти, які формуються в індикаторних видах під впливом стану довкілля в місцях спостереження [7,19–22]. Особливе значення у цьому контексті мають рослини, життєдіяльність яких тісно пов’язана з якістю середовища проживання, що робить їх ефективними біоіндикаторами різноманітних екологічних порушень.

Одним із найбільш чутливих і доступних для кількісного аналізу показників стану рослин є явища флуктуючої асиметрії, які охоплюють майже всі білатеральні морфологічні структури та відображають ступінь випадкових порушень у процесах індивідуального розвитку [23].

До морфологічних трансформацій рослин — ознак, широко застосовуваних у біоіндикаційних дослідженнях, — належать:

1. передчасне старіння, яке часто спричинюється дією газоподібних токсикантів, зокрема діоксиду сірки;
2. зміни розмірів органів, що зазвичай є неспецифічними: так, поблизу підприємств хімічної промисловості рослини можуть видовжуватися під впливом нітратів або, навпаки, зменшуватися під дією сірчистого газу; димові викиди часто зумовлюють зменшення листкової пластинки;
3. порушення форми, кількості та просторового розташування органів – аномальна морфологія листків фіксується після радіаційного опромінення, локальні некрози можуть спричинити викривлення, асиметрію, зрощення або розщеплення структур рослини;
4. зміна життєвої форми, яка відображає довготривалі адаптаційні процеси;
5. порушення функціональної діяльності, що охоплюють фотосинтетичні та обмінні процеси [1,12,24].

Серед рослин, які застосовуються як індикатори стану довкілля, виділяють дві основні групи:

– види, що чутливо реагують на зміну якості середовища (інформують про загальну величину техногенного навантаження на повітря та ґрунт);

– види-накопичувачі, здатні акумулювати у тканинах певні токсиканти й сигналізувати про специфічні забруднювачі [2, 25].

Первинні реакції рослин на вплив газоподібних полютантів, як правило, проявляються у зниженні транспірації та інтенсивності фотосинтезу, погіршенні поглинальної здатності кореневої системи. На цьому етапі зміни мають зворотний характер. Подальша дія токсикантів призводить до глибших порушень клітинного метаболізму, що відбивається на білковому, вуглеводному та фосфорному обміні [19, 26].

Фізіологічна та біохімічна пластичність рослин проявляється через адаптивні зміни хімічного складу тканин, інтенсивності фізіологічних процесів та загальної стійкості до несприятливих умов. Окрему групу адаптивних механізмів формують біологічні особливості, пов’язані з відтворенням, — модифікації у структурі квітки, насіння, спор, зміни у процесах запилення, рівні насіннєвої продуктивності тощо [7,13,21, 27].

Особливе місце серед біоіндикаторів займають лишайники, які понад століття використовуються як надійні індикатори чистоти атмосферного повітря. Оскільки більшість необхідних для їх існування мінеральних елементів лишайники отримують шляхом прямого поглинання з атмосфери, вони надзвичайно чутливі до концентрацій пилу та газоподібних забруднювачів [8,28].

Застосування рослин як інструменту для оцінювання стану довкілля становить концептуальну основу фітоіндикаційних досліджень. Ефективність біоіндикації значною мірою визначається коректністю добору біоіндикаторних видів, оскільки саме їхня чутливість та специфічні реакції дозволяють відображати якість середовища проживання [14, 29].

Біологічні індикатори, відповідно до загальноприйнятого визначення, – це організми, котрі реагують на зміни навколишнього середовища комплексом зовнішніх або фізіолого-біохімічних ознак, проявом яких може бути їх присутність чи відсутність, модифікація морфології, зміна хімічного складу або поведінкові реакції [30].

В екологічному моніторингу оцінювання забруднення за допомогою біоіндикаторів нерідко виявляється більш інформативним, ніж прямі інструментальні вимірювання концентрацій полютантів. Це зумовлено тим, що живі організми реагують на сукупну дію комплексу забруднювачів та відображають їх вплив протягом тривалого періоду, завдяки чому мають своєрідну «екологічну пам'ять» [18, 31].

У трактуванні Н. Ф. Реймерса, біоіндикатором є вид або група організмів, за станом і поведінкою яких можна оцінювати зміни довкілля, включно із виявленням наявності та концентрацій забруднювальних речовин. **І**ндикаторне угруповання – це спільнота, структурні та динамічні характеристики якої дозволяють визначати загальну екологічну ситуацію, включаючи природні та антропогенні зміни [32].

Виділяють кілька основних груп біоіндикаторів:

1. **і**ндивідуальні (розміри особин, плодючість, наявність морфологічних аномалій),
2. процесні (зміни швидкості фізіологічних процесів, як-от фотосинтез),
3. структурні (видовий склад, співвідношення толерантних видів, біотичні індекси),
4. екосистемні (видове різноманіття, структура біоценозів) [22, 33].

До біоіндикаторів забруднення належать організми, що: – здатні акумулювати у своїх тканинах токсичні речовини і слугують індикаторами їх присутності;

– сигналізують про якість води або ґрунту за самою своєю появою чи зникненням [2, 34].

На відміну від біомаркерів, які реагують на зміни екологічних умов миттєво на клітинному або субклітинному рівні, біоіндикатори відображають популяційні та ценотичні процеси, що робить їх незамінними при довготривалому моніторингу. Їх перевагою є здатність показувати зміни, які справді впливають на стійкість популяцій та екосистем, тоді як короткочасні коливання середовища не завжди призводять до суттєвих порушень у біоценозах [3, 35].

Як зазначає О. Опекунова, нині існує значний арсенал методик, спрямованих на оцінювання стану довкілля за допомогою індикаторних видів та аналізу структурно-функціональних характеристик біоценозів. Найбільш уживаними є методи: біогеохімічний, спектрофотометричний, мікробіологічний, фітоіндикаційний, зооіндикаційний, біоценотичний та біотестування [2, 13, 36].

Із посиленням антропогенного навантаження біогеоценози зазнають глибоких структурних і функціональних трансформацій. Рослинний покрив, як чутливий компонент екосистем, одним із перших реагує на зміни середовища, тому серед біоіндикаторів найчастіше застосовують лишайники, мохи та вищі рослини. Їх прикріплений тип життя зумовлює високу залежність від стану атмосферного та ґрунтового середовища [7, 11, 37].

Фітоіндикаційні методи характеризуються високою чутливістю: вони дозволяють реєструвати концентрації забруднювачів у 3–5 разів нижчі за гігієнічні нормативи ГДК, визначати рівень та небезпеку токсичного навантаження, встановлювати межі антропогенної дигресії, оцінювати внесок окремих джерел емісій і прогнозувати подальший розвиток екологічної ситуації [24, 28, 38].

Фітоценотичний аналіз

У процесі дослідження рослинного покриву оцінюють:

– видовий склад,

– щільність та порушеність рослинного покриву,

– його стійкість до дії несприятливих чинників.

Стійкість фітоценозів визначається здатністю протистояти порушенням, швидкістю відновлення та толерантністю видів, що їх формують.

Одним із найпоширеніших індикаторних критеріїв є зміна хімічного складу біомаси, зокрема накопичення полютантів [17, 26, 39]. Так, у рослин різних видів вміст шкідливих елементів залежить від віку листя:

– у липи, клена платановидного та бузку найбільша концентрація фіксується у молодих листках;

– у каштана, тополі, дерену та жимолості – у зрілих листках.

Макроскопічні та мікроскопічні ознаки індикації

Макроскопічні реакції включають:

– хлорози,

– почервоніння листкових пластинок,

– побуріння та бронзовіння,

– некрози різного типу (точкові, крайові, міжжилкові, верхівкові).

Серед мікроскопічних змін виділяють:

– модифікацію розмірів клітин (збільшення смоляних ходів у сосни, зменшення клітин епідермісу),

– зміни субклітинних структур,

– плазмоліз,

– розвиток ксероморфних ознак – потовщення кутикули, збільшення кількості продихів, підвищення сукулентності [33, 40].

1.3 Використання *Plantago major* L. для фітотестування урбанізованих територій

Серед широкого спектра рослин, здатних реагувати на антропогенні зміни середовища, особливе місце займає *Plantago major* L. (подорожник великий), який вважається одним із найбільш перспективних видів для фітоіндикаційних та фітотестових досліджень у межах урбанізованих територій. Його застосування ґрунтується на поєднанні морфологічної пластичності, високої

екологічної толерантності та здатності швидко акумулювати забруднювальні речовини у вегетативних органах [23].

Plantago major належить до космополітних видів з широким екологічним ареалом, що характеризується вираженою стійкістю до механічних порушень ґрунту, витоптування, ущільнення поверхневого шару, дії важких металів, нафтопродуктів та інших елементів урбогенного середовища. Саме ця сукупність ознак робить вид індикатором, який чутливо реагує на ступінь техногенного навантаження, але при цьому зберігає життєздатність навіть на деградованих ділянках [2, 16].

У біомоніторингових дослідженнях *P. major* проявляє низку специфічних реакцій, що можуть бути використані для оцінювання стану довкілля:

– зміна морфометричних параметрів листкової пластинки (площа, довжина, ширина, співвідношення довжини черешка до листкової пластинки);

– підвищення рівня флуктуючої асиметрії як показника дестабілізації онтогенезу під впливом комплексу забруднювачів;

– накопичення важких металів (Pb, Cd, Zn, Cu, Ni) у листках та коренях, що дозволяє використовувати рослину як акумулятивний індикатор;

– зміна анатомічної будови листкової тканини, зокрема товщини палісадного мезофілу, кількості продихів, ступеня кутикулярного покриву;

– реакції пігментного комплексу, що проявляються у зниженні вмісту хлорофілів a і b під впливом газоподібних полютантів [3].

Перевагою *Plantago major* є те, що рослина належить до стенотопних індикаторів, здатних відображати навіть незначні зміни у структурі урбанізованого середовища, включаючи вплив транспортних викидів, промислового пилу та зміни фізико-хімічних властивостей ґрунту. Дослідження засвідчують, що у зонах інтенсивної автомобільної активності листки подорожника містять підвищені концентрації Pb та Cd, тоді як у віддалених зелених зонах ці показники значно нижчі. Це дозволяє застосовувати вид як природний детектор ступеня техногенного навантаження [33, 40].

Окрім того, *P. major* формує численні й стабільні ценопопуляції, що робить можливим проведення порівняльних досліджень у різних функціональних зонах міста (центральні вулиці, промислові майданчики, житлова забудова, рекреаційні території). Висока репродуктивна здатність, переважання насіннєвого розмноження та швидке відновлення надземних органів дозволяють отримувати достовірні результати вже на ранніх етапах антропогенного впливу [13].

Таким чином, *Plantago major* є науково обґрунтованим, доступним і чутливим індикатором екологічного стану урбанізованих територій. Поєднання морфологічних, анатомічних та біохімічних реакцій виду забезпечує можливість комплексного оцінювання рівня забруднення, що дозволяє рекомендувати його для системи фітотестування, експрес-моніторингу та кількісної оцінки техногенного навантаження у містах.

РОЗДІЛ 2.
УМОВИ, ОБ'ЄКТИ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Умови проведення досліджень

Польові та лабораторні дослідження проводилися в умовах, що забезпечували репрезентативність отриманих результатів та дозволяли простежити вплив різного рівня антропогенного навантаження на морфометричні та фізіолого-біохімічні показники *Plantago major* L. Польовий етап виконували упродовж вегетаційного періоду (квітень–вересень), що забезпечило можливість аналізу рослин на різних онтогенетичних стадіях.

Дослідження здійснювали на трьох контрастних стаціях, що суттєво різнилися умовами середовища та інтенсивністю техногенного впливу:

1. Білогрудівський лісовий масив — територія з мінімальним антропогенним пресингом, що характеризується стабільним мікрокліматом, відносно незміненим ґрунтовим профілем і низьким рекреаційним навантаженням;
2. Дендрологічний парк «Софіївка» — зона помірної урбанізації, де поєднуються природні та штучно створені фітоценози, а на рослинні угруповання впливають рекреаційне використання території та локальні техногенні стресори;
3. Парк ім. Т. Г. Шевченка — урбанізована територія зі значним антропогенним навантаженням, ущільненням ґрунтів, забрудненням повітря та підвищеним потоком рекреантів.

Проби відбирали з дотриманням єдиної методики: рослини фіксували на ділянках площею по 1 м², відібрані особини поділяли на прегенеративні, генеративні та постгенеративні групи. Для мінімізації випадкових відхилень кожен параметр визначали у 20–25 рослин на кожній стації.

Лабораторні дослідження проводили у контрольованих умовах із дотриманням стабільного температурного режиму (20–22 °C), стандартної

вологості повітря та норм освітлення. Морфометричні вимірювання виконували з використанням лінійок, цифрових штангенциркулів та мікроскопічного обладнання. Інтенсивність перекисного окиснення ліпідів визначали спектрофотометричним методом за вмістом малонового діальдегіду.

Такий підхід забезпечив зіставність даних між різними стаціями, а також дозволив виявити об'єктивні закономірності реакції *Plantago major* L. на зміну ступеня антропогенного навантаження.

2.2 Об'єкт досліджень

Об'єктом досліджень є ценопопуляції подорожника великого (*Plantago major* L.), що зростають у природних та урбанізованих фітоценозах із різним рівнем антропогенного навантаження. Вибір виду зумовлений його широкою екологічною амплітудою, високою адаптивною пластичністю, здатністю формувати стабільні популяції у трансформованих екосистемах, а також чутливістю до змін умов середовища, що робить *P. major* інформативним біоіндикатором стану довкілля.

У межах дослідження об'єкт представлено рослинними угрупованнями трьох типів екотопів: природного лісового масиву (Білогрудівський ліс), напівурбанізованого антропогенно трансформованого середовища (дендрологічний парк «Софіївка») та урбанізованої рекреаційної території (парк ім. Т. Г. Шевченка). У кожному з локалітетів рослини характеризуються специфічними умовами існування, що дозволяє комплексно оцінити реакції популяцій на різні рівні техногенного пресингу.

2.3 Методика проведення досліджень

Методика досліджень була спрямована на комплексну оцінку морфометричних та фізіолого-біохімічних показників *Plantago major* L., що зростає в умовах різного рівня антропогенного навантаження. Дослідження

включали польовий, камеральний та лабораторний етапи, які забезпечили всебічний аналіз стану ценопопуляцій і визначення індикаторної ролі виду в оцінюванні урбанізованих територій.

Польові дослідження проводилися на трьох стаціях, що відрізняються за рівнем техногенного пресингу:

– Майданчик №1 — дендрологічний парк «Софіївка»;

– Майданчик №2 — парк ім. Т. Г. Шевченка (інтенсивне рекреаційне навантаження);

– Майданчик №3 — Білогрудівський лісовий масив (контрольна територія з мінімальним антропогенним впливом).

На кожній ділянці було закладено пробні площі, з яких проводили відбір рослин *P. major* різних онтогенетичних станів: прегенеративних, генеративних та постгенеративних особин. Для кожної вікової групи вимірювали такі морфометричні параметри:

– довжина листкової пластини;

– ширина листка;

– площа листкової пластини;

– довжина черешка;

– довжина квітконоса у генеративних рослин.

Вимірювання виконували з використанням рулетки, штангенциркуля та міліметрової шкали з точністю до 0,1 см. Площа листкової пластини визначалась планіметричним методом.

Отримані польові дані підлягали статистичній обробці для визначення варіабельності морфометричних параметрів. Для оцінювання мінливості ознак розраховували середні величини, стандартні відхилення та діапазон варіювання. Побудовані гістограми дозволили порівняти морфометричні коефіцієнти між стаціями та визначити просторові відмінності розвитку особин різних вікових груп.

У лабораторних умовах здійснювали визначення інтенсивності перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ) як універсального маркера стресу.

Кількісну оцінку проводили за вмістом малонового діальдегіду (МДА), який утворюється внаслідок пероксидної деградації жирних кислот мембран. Аналіз виконували за методом реакції з тіобарбітуровою кислотою, що дозволяє визначити концентрацію МДА за оптичним поглинанням реакційної суміші.

Лабораторні визначення здійснювали для всіх вікових груп рослин з кожного локалітету, що дозволило оцінити інтенсивність ПОЛ і порівняти стійкість рослин залежно від умов середовища.

На заключному етапі проводилася інтеграція морфометричних та біохімічних показників з метою визначення індикаторного потенціалу *Plantago major*. Зіставлення даних дозволило встановити взаємозв'язок між рівнем антропогенного навантаження та реакцією рослин на стресові чинники.

Аналіз інтенсивності перекисного окиснення ліпідів у рослинному матеріалі здійснювали в умовах Науково-дослідної лабораторії біологічних основ продуктивності рослин Уманського НУС.

2.4 Охорона праці та безпека виконання наукових досліджень

Проведення лабораторних та польових досліджень, пов'язаних із вивченням морфометричних та фізіолого-біохімічних показників Plantago major L., потребує дотримання комплексу вимог з охорони праці, техніки безпеки та санітарно-гігієнічних норм. Забезпечення безпечних умов роботи є необхідною передумовою наукової діяльності та спрямоване на мінімізацію професійних ризиків, пов'язаних із використанням хімічних реактивів, лабораторного обладнання та польового інструментарію.

Лабораторні роботи, що включають визначення інтенсивності перекисного окиснення ліпідів та виконання спектрофотометричних аналізів, здійснювалися у спеціально оснащеному приміщенні, яке відповідає вимогам ДСТУ з вентиляції, освітлення та мікроклімату. Усі дослідження проводилися у захисних халатах, рукавицях та окулярах. Перед початком роботи персонал проходив інструктаж щодо правил користування спектрофотометром,

центрифугою, хімічними реактивами, зокрема з тими, що становлять потенційну небезпеку (розчини ТБК, кислоти, органічні розчинники).

Особлива увага приділялась організації роботи з хімічними речовинами: зберігання реактивів здійснювалось у промаркованих контейнерах, усі операції з леткими чи токсичними речовинами виконувались під витяжною шафою. Заборонялося підігрівання реактивів на відкритому вогні, змішування несумісних компонентів та робота без засобів індивідуального захисту.

Польові дослідження, що включали відбір рослинного матеріалу, вимірювання морфометричних ознак та фіксацію даних, проводилися на трьох стаціях із різним рівнем антропогенного навантаження. Під час роботи в природних умовах дотримувалися таких заходів безпеки:

— використання відповідного взуття та одягу для запобігання травмам, перегріванню чи переохолодженню;

— робота лише в денний час доби при належній видимості;

— застосування захисних рукавиць під час контакту із ґрунтом і рослинним матеріалом;

— дотримання правил безпечного пересування у міських зонах з підвищеним транспортним та рекреаційним навантаженням;

— уникнення територій із небезпечним рельєфом, отруйними рослинами чи потенційно небезпечними тваринами;

— заборона відбору зразків поблизу автомобільних доріг без засобів сигнального маркування.

Під час роботи з гострими інструментами (ножі, лінійки, ножиці) дотримувалися встановлених правил їх транспортування, очищення та зберігання.

Лабораторне приміщення було обладнане вогнегасниками, аптечкою першої допомоги та аварійною вентиляційною системою. Усі учасники досліджень були ознайомлені з планом евакуації, правилами повідомлення про пожежу чи іншу надзвичайну ситуацію.

До початку експериментів проведено інструктаж щодо дій у разі:

— загоряння електрообладнання;

— розливу токсичних або корозійних речовин;

— порушення цілісності лабораторного посуду;

— отримання травми чи хімічного опіку.

Згідно з нормами охорони праці, категорично заборонялося вживання їжі, напоїв чи зберігання особистих речей у робочій лабораторній зоні.

Потенційні ризики при виконанні досліджень включали вплив хімічних реагентів, можливість механічних травм, перенавантаження під час польових робіт та вплив факторів зовнішнього середовища. Для їх мінімізації були запроваджені такі заходи:

— регулярне провітрювання лабораторії;

— використання антибактеріальних засобів після завершення робіт із рослинним матеріалом;

— утилізація відходів відповідно до санітарно-екологічних вимог;

— дотримання регламентованої тривалості безперервної роботи;

— проходження первинного та повторного інструктажів із техніки безпеки.

Дотримання вимог охорони праці під час проведення досліджень забезпечило безпечні умови роботи, мінімізувало ризики для здоров’я учасників експерименту та сприяло отриманню достовірних результатів. Комплекс застосованих заходів відповідав чинним нормативним документам України та гарантував належний рівень безпеки при виконанні дипломної роботи.

РОЗДІЛ 3

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Аналіз морфометричної мінливості *Plantago major* в умовах антропогенного навантаження

У сучасних ценопопуляційних дослідженнях екологічного профілю провідну роль відіграють морфометричні характеристики, які відображають кількісні параметри розвитку рослинних організмів та можуть слугувати надійними індикаторами їх життєвого стану. Особливе значення надається тим морфометричним показникам, що репрезентують рівень екологічної пластичності окремих особин і здатність популяції адаптуватися до варіативних умов середовища. Як зазначав А. В. Злобін (1989), у процесі діагностики життєвого стану індивідів та аналізу онтогенетичної структури популяцій саме кількісні ознаки мають найбільшу інформативність і прогностичну цінність, оскільки вони відображають реакції організмів на абіотичні та антропогенні чинники з високим ступенем чутливості [28].

У межах проведеного дослідження одним із ключових морфометричних параметрів було обрано довжину листкової пластинки, оскільки цей показник чітко реагує на зміни умов зростання та відображає ступінь онтогенетичної зрілості рослин. Вимірювання здійснювали окремо для рослин різних онтогенетичних станів — прегенеративних, генеративних та постгенеративних особин, що забезпечило можливість комплексного аналізу популяційної структури та функціонування виду в умовах трьох контрастних стацій.

Отримані результати засвідчили суттєву просторову варіабельність морфометричних параметрів. Найбільша середня довжина листкових пластинок (4,69 см) була зафіксована у прегенеративних рослин, що зростали на пробній площі № 3, розташованій у межах Білогрудівського лісового масиву. Ймовірно,

більш стабільні мікрокліматичні умови та менший рівень антропогенного навантаження в цій локації сприяли інтенсивнішому росту листкових органів.

Найменше значення довжини листа (3,67 см) зареєстровано в особин *Plantago major*, що трапляються на пробній площі № 2 — у парку ім. Т. Г. Шевченка, де на рослинні угруповання впливають підвищене рекреаційне навантаження та урбогенні фактори. На території пробної площі № 1 — дендрологічного парку «Софіївка» — середній показник довжини листка становив 3,99 см, що відображає помірний рівень антропогенного пресингу та відносно сприятливий фітоценотичний режим (рис. 3.1).

Загалом варіабельність цього показника підтверджує, що довжина листкової пластинки є чутливим індикатором ступеня екологічної трансформації середовища та дозволяє здійснювати порівняльний аналіз стану ценопопуляцій у різних урбо- та лісових локаціях.

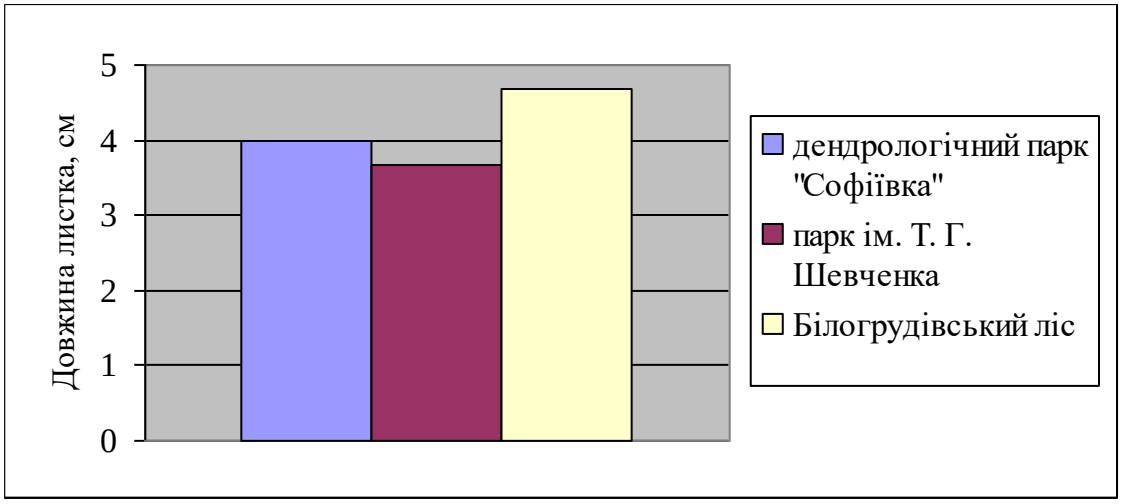


Рис 3.1. Розподіл середніх показників довжини листкової пластинки прегенеративних особин *Plantago major L.* на дослідних майданчиках

Подальше опрацювання даних, отриманих у процесі визначення середніх значень довжини листкової пластинки генеративних особин *Plantago major*, дало змогу виявити чіткі просторові відмінності у формуванні цього морфометричного показника. Згідно з результатами аналізу, найвищі значення довжини листа характерні для рослин, що зростають на пробній площі № 3,

розташованій у межах Білогрудівського лісового масиву. Середній показник для цієї ділянки становив 10,55 см, що може свідчити про більш стабільні умови середовища, менш виражений антропогенний тиск і оптимальніший гідротермічний режим, порівняно з іншими стаціями.

Натомість у рослин, відібраних на пробних площах урбанізованого типу — території дендрологічного парку «Софіївка» (майданчик № 2) та парку ім. Т. Г. Шевченка (майданчик № 1) — середні значення довжини листкової пластинки були істотно меншими і становили відповідно 5,62 см та 5,66 см. Незначна різниця між цими двома локалітетами може бути зумовлена подібними умовами антропогенного впливу, включаючи рекреаційне навантаження, ущільнення ґрунту, забруднення повітря та зміну мікрокліматичних показників.

Візуалізація отриманих результатів наведена у вигляді гістограми (рис. 3.2), що демонструє виразну диференціацію морфометричного параметра залежно від екологічних умов досліджуваних ділянок. Виявлені закономірності підтверджують доцільність використання довжини листа генеративних рослин як чутливого індикатора стану ценопопуляцій *Plantago major* у межах територій із різним ступенем антропогенної трансформації.

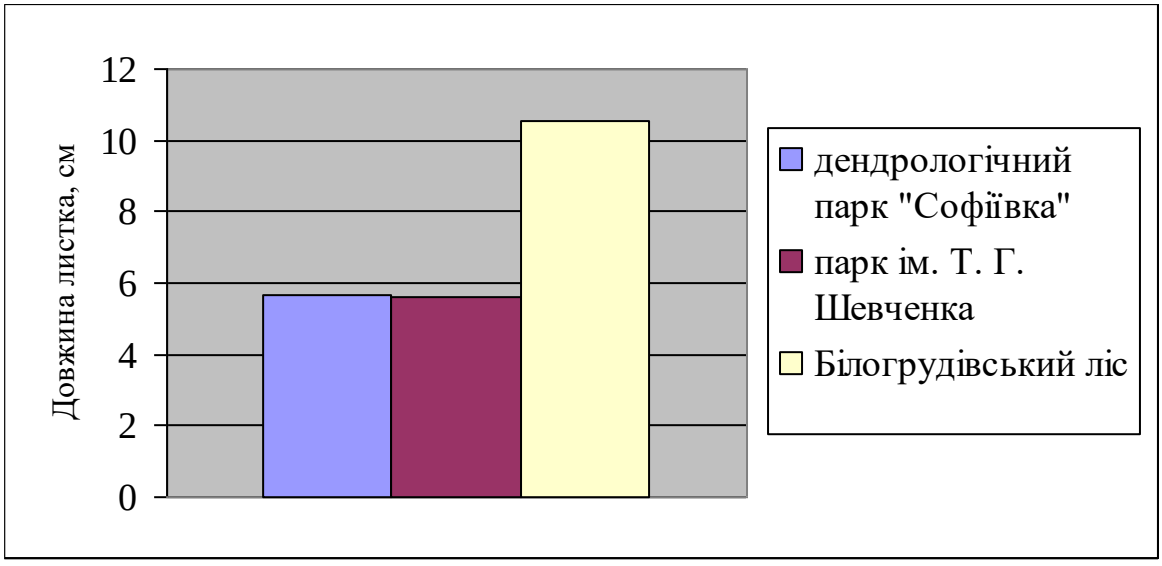


Рис. 3.2. Порівняльна динаміка середніх значень довжини листка генеративних рослин у межах трьох екотопів

Аналіз варіації морфометричного показника довжини листка у постгенеративних особин *Plantago major* дав змогу встановити суттєві відмінності між досліджуваними ділянками. Найбільше середнє значення цього параметра було зафіксовано на пробній площі № 3, розташованій у межах Білогрудівського лісового масиву, де довжина листка сягала 8,39 см. Така тенденція може свідчити про сприятливішу екологічну ситуацію та менший рівень антропогенного навантаження порівняно з іншими локалітетами.

Найменший середній показник довжини листкової пластинки (6,96 см) спостерігався у рослин, що зростають на майданчику № 2 — території парку ім. Т. Г. Шевченка. Очевидно, що більш інтенсивний рекреаційний вплив, ущільнення ґрунту та забруднення повітря позначаються на морфометричних характеристиках виду.

На пробній площі № 1, яка знаходиться в дендрологічному парку «Софіївка», середнє значення довжини листка становило 7,31 см, що займає проміжне положення між іншими двома стаціями та може бути відображенням помірного антропогенного пресингу.

Графічне представлення отриманих результатів наведено на рис. 3.3, де простежується чітка диференціація морфометричних ознак залежно від екологічних умов кожної з досліджених територій.

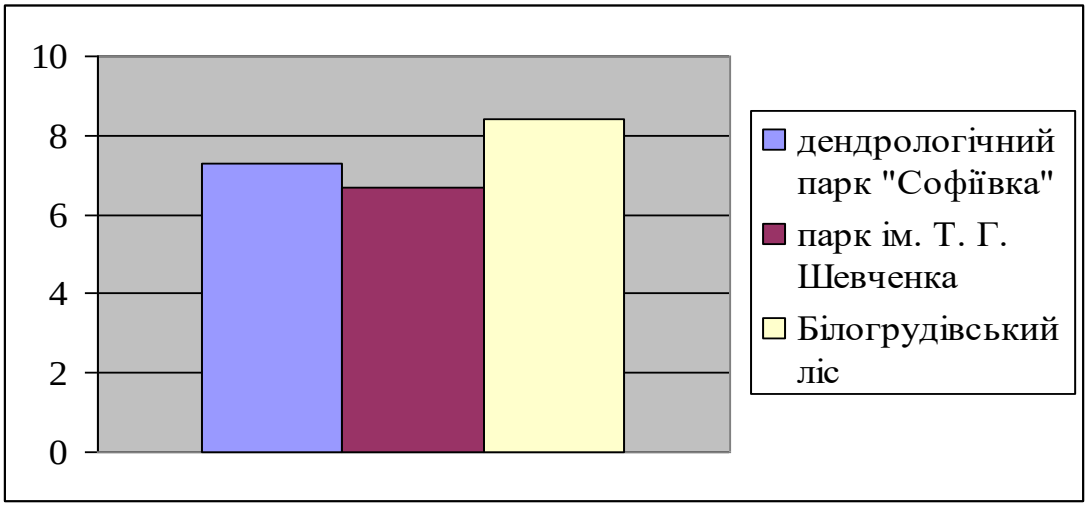


Рис. 3.3. Середні параметри довжини листкової пластини у постгенеративних особин *Plantago major* в різних умовах середовища

У ході проведеного дослідження була здійснена оцінка варіабельності середніх значень ширини листкової пластинки прегенеративних особин *Plantago major L.* на трьох дослідних майданчиках. Аналіз отриманих даних засвідчив, що найнижчий показник ширини листка зафіксовано у рослин, які зростають на ділянці № 2, — він становив лише 2,58 см, що може бути наслідком підвищеного техногенного пресингу та рекреаційного навантаження. Натомість максимальне значення цього морфометричного параметра визначено для рослин зі стації № 3, де ширина листка досягала 3,27 см. Це свідчить про сприятливіші умови зростання на території Білогрудівського лісового масиву порівняно з іншими локаціями. Графічне відображення отриманих результатів подано на рис. 3.5.

Паралельно проаналізовано варіацію площі листкової пластини молодих особин, що зростають у регіонах із різним ступенем антропогенного впливу. Встановлено чітку тенденцію до збільшення площі листка за умов мінімального техногенного навантаження: максимальний показник (15,30 см²) спостерігався на майданчику № 3, тоді як мінімальне значення (9,47 см²) — на майданчику № 2. Значення цього показника на ділянці № 1 становило 11,50 см², що відповідає проміжному рівню та відображає помірний характер антропогенного впливу у межах дендрологічного парку «Софіївка».

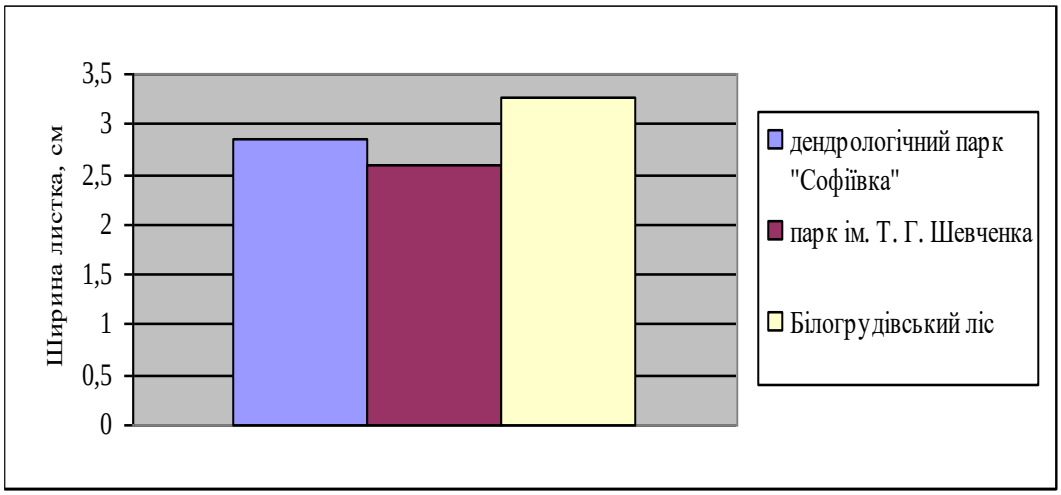


Рис. 3.4. Варіація середніх значень ширини листкової пластини молодих рослин на дослідних ділянках

Результати морфометричного аналізу свідчать про суттєву варіабельність середнього значення довжини листкової пластини у генеративних особин *Plantago major L.* залежно від умов середовища. Найбільше значення цього параметра (7,76 см) зафіксовано для рослин, що зростають на майданчику № 3, розташованому у Білогрудівському лісовому масиві. Це підтверджує сприятливі екологічні умови даної локальної популяції. У рослин, які зростають на майданчиках № 1 та № 2, різниця між показниками була незначною: середня довжина листкової пластинки становила 4,02 см та 4,08 см відповідно (рис. 3.5).

Аналіз площі листкової пластини генеративних рослин також продемонстрував виразні відмінності між досліджуваними територіями. На майданчику № 1 значення площі листка становило 22,75 см², а на майданчику № 2 – 22,90 см², тобто параметри перебували на близькому рівні. Натомість для рослин, що зростають на майданчику № 3, цей показник був істотно вищим і досягав 81,76 см². Така різниця свідчить про значно кращі умови живлення, вологозабезпечення та загального екологічного стану на території лісового масиву порівняно з урбанізованими та напівурбанізованими ділянками.

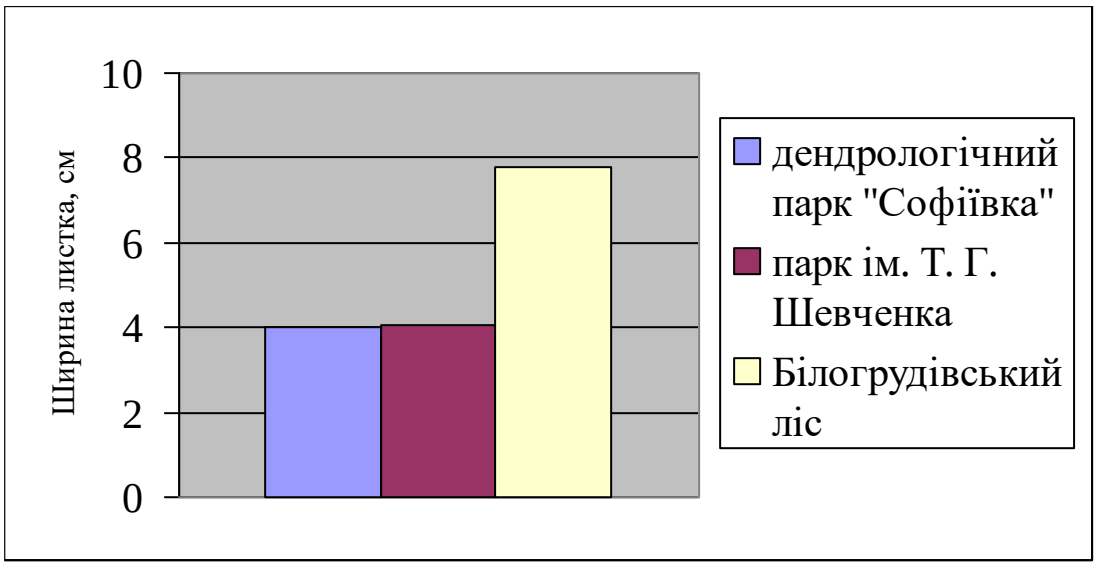


Рис. 3.5. Порівняння ширини листкової пластини генеративних особин *Plantago major L.* у трьох контрастних стаціях

Аналіз варіабельності середніх значень ширини листкової пластинки у постгенеративних особин *Plantago major L.* засвідчив чіткі відмінності між

досліджуваними ділянками. Найвищий показник цього параметра зафіксовано на майданчику № 3, де ширина листкової пластини становила 6,49 см. У рослин, що зростають на майданчиках № 1 та № 2, різниця між відповідними значеннями була порівняно незначною: 5,58 см та 5,17 см відповідно. Графічне відображення отриманих результатів наведено на рис. 3.6, що демонструє виразну тенденцію до збільшення ширини листкової пластини за умов мінімального антропогенного пресингу.

Подальший морфометричний аналіз показав суттєву диференціацію площі листкової пластини у постгенеративних рослин залежно від екологічних умов локалітетів. Максимальне значення цього параметра (54,44 см²) зафіксовано на майданчику № 3, що вказує на сприятливі умови для росту й розвитку рослин у межах лісової екосистеми. Натомість мінімальний показник площі листка (35,98 см²) встановлено для рослин, що зростають на майданчику № 2, де антропогенний вплив є значно вищим.

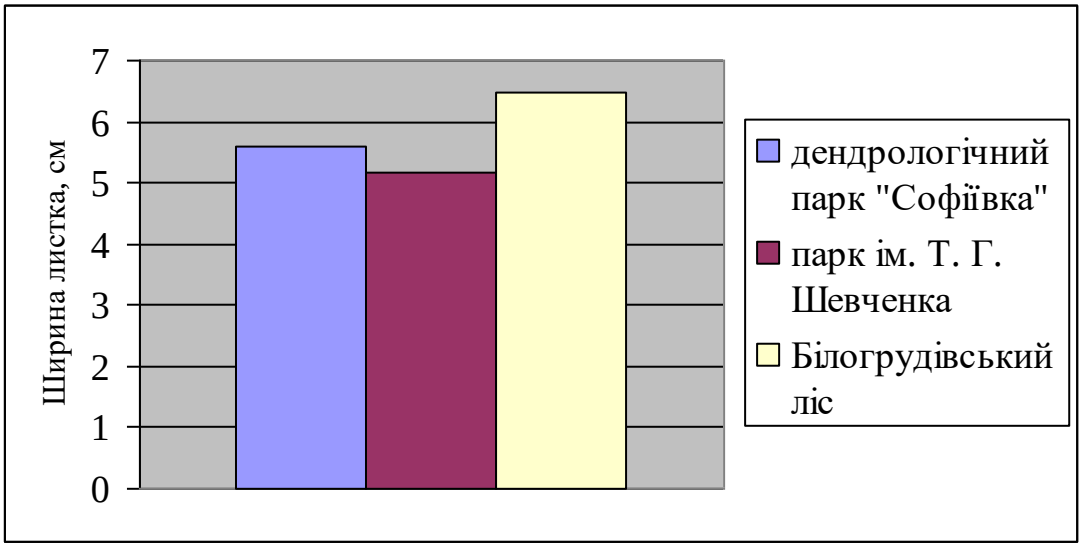


Рис. 3.6. Просторові відмінності середніх значень ширини листкової пластини у постгенеративних рослин

У ході проведеного експериментального дослідження було визначено низку статистичних показників, що комплексно характеризують морфометричний стан особин *Plantago major L.* на момент відбору матеріалу. Одним із ключових параметрів, які забезпечують інформативність оцінки, є

довжина черешка, оскільки цей показник чутливо реагує на зміни середовища та може слугувати індикатором рівня стресового навантаження.

Отримані результати демонструють суттєву різницю між дослідними майданчиками. Найбільша середня довжина черешка була зафіксована у рослин, що зростають на ділянці № 3, де цей показник становив 6,89 см, що вказує на сприятливі умови розвитку у межах Білогрудівського лісового масиву. Натомість рослини, відібрані на майданчиках № 1 та № 2, мали значно нижчі значення — 2,95 см та 2,84 см відповідно, причому різниця між ними була незначною. Це може свідчити про вплив антропогенних факторів, які характерні для урбанізованих територій та рекреаційних зон.

Графічна інтерпретація розподілу середніх значень довжини черешка генеративних рослин наведена на рис. 3.7, що дозволяє наочно простежити відмінності між локалітетами та підтвердити встановлені закономірності.

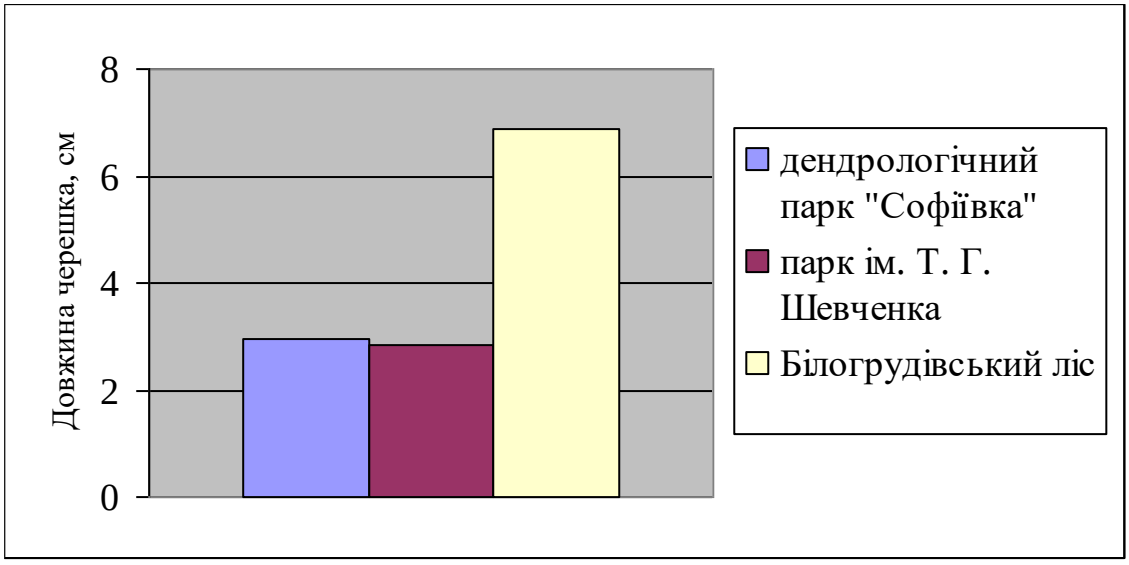


Рис. 3.7. Середні значення довжини черешка молодих рослин на територіально різних ділянках

Аналіз морфометричних показників генеративних особин *Plantago major L.* засвідчив істотну варіабельність довжини черешка залежно від умов зростання. Найвище значення цього параметра виявлено на майданчику № 3, де середній показник становив 8,23 см. Натомість мінімальні значення

зареєстровано у рослин з майданчиків № 1 та № 2 — 3,89 см і 3,92 см відповідно. Узагальнені дані подано на рис. 3.8.

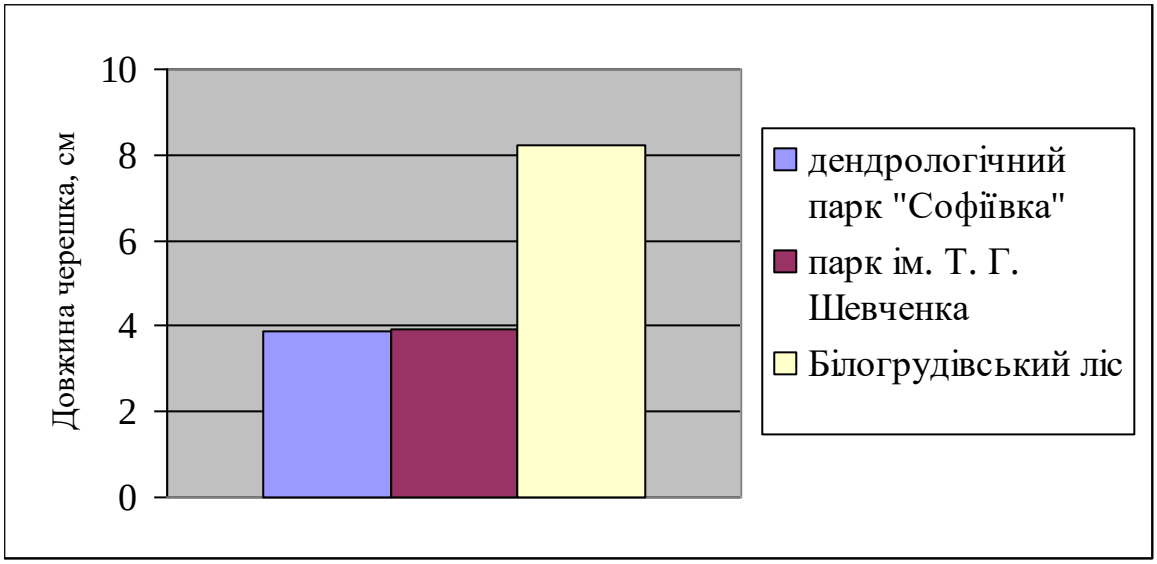


Рис. 3.8. Диференціація середніх величин довжини черешка генеративних особин *Plantago major* у різних екотопах

Аналіз середніх значень довжини черешка у постгенеративних особин *Plantago major L.* засвідчив чітку диференціацію цього параметра між досліджуваними майданчиками. Максимальна величина (7,54 см) зафіксована у рослин, що зростають на майданчику № 3, що вказує на сприятливіші умови розвитку. Натомість значення, отримані на майданчиках № 1 та № 2, виявилися нижчими й різнилися незначно — 5,66 см та 5,01 см відповідно. Узагальнені результати морфометричного аналізу подано на рис. 3.9.

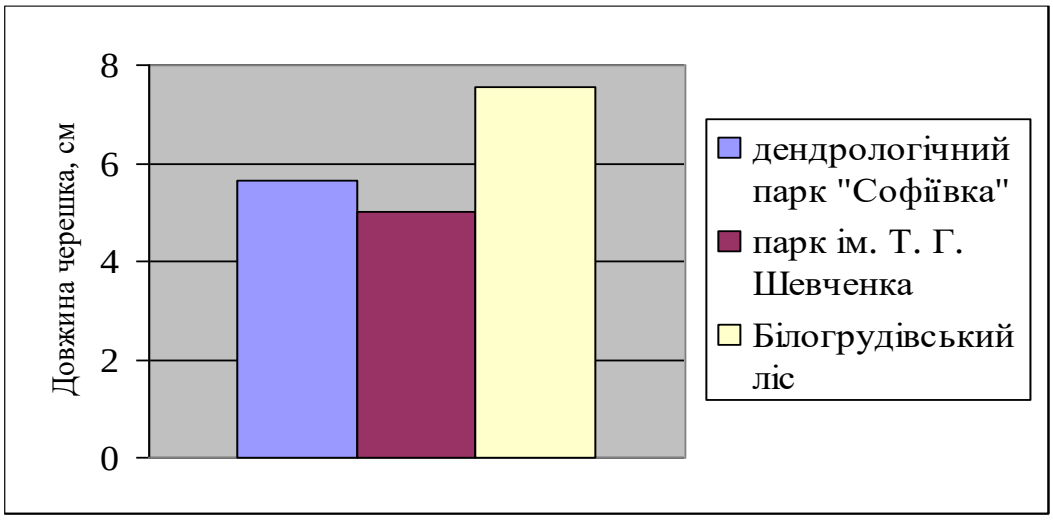


Рис. 3.9. Розподіл середніх значень довжини черешка постгенеративних рослин у різних умовах зростання

У процесі проведених досліджень виявлено виразні морфологічні відмінності за довжиною квітконосу у генеративних особин *Plantago major L.*, що зростають у середовищах з різним рівнем антропогенного навантаження. Мінімальні значення цієї ознаки (5,99 см) зафіксовано у вибірці, відібраній на майданчику № 2, що свідчить про більш несприятливі умови існування. Натомість максимальна довжина квітконосу (12,99 см) характерна для рослин, які зростають на майданчику № 3, що може бути опосередковано пов’язано з кращим станом ґрунтово-екологічних умов та меншим рівнем техногенного пресингу. На майданчику № 1 відповідний показник становить 8,10 см, тобто займає проміжне положення між двома іншими ділянками.

У межах кожної популяції спостерігається варіювання як загальних розмірів рослин, так і параметрів окремих органів, що відображає рівень їх морфофункціональної пластичності. Згідно з положеннями, викладеними Кашиним А. С. (2015), морфометричні ознаки, включно з характеристиками листкової пластини та генеративних органів, є ключовими параметрами адаптивної пластичності, яка забезпечує життєздатність популяцій за умов змін середовища.

Аналіз вікових груп *P. major* показав, що саме на майданчику № 3 у всіх онтогенетичних станах фіксуються максимальні значення довжини листка: 4,69 см у молодих особин, 10,55 см — у генеративних, 8,39 см — у постгенеративних. На ділянках № 1 та № 2 амплітуда цього показника значно нижча та варіює у межах, близьких між собою, проте істотно поступається величинам, зафіксованим на майданчику № 3. Наприклад, середня довжина листка генеративних рослин на майданчиках № 2 і № 1 становить 5,62 см та 5,66 см відповідно.

Подібна закономірність простежується і для ширини листкової пластини. Найвищі значення цього параметра характерні для рослин, що зростають на майданчику № 3: 3,27 см у прегенеративних особин, 7,76 см — у генеративних, 6,49 см — у постгенеративних. Водночас рослини на майданчиках № 1 та № 2 демонструють істотно нижчі показники. Для постгенеративних особин ширина

листкової пластини становить 5,58 см (майданчик № 1) та 5,17 см (майданчик № 2), що свідчить про загальне зниження інтенсивності ростових процесів під впливом антропогенних факторів.

3.2 Оцінка інтенсивності перекисного окиснення ліпідів у Plantago major за умов антропогенного впливу

Важкі метали та інші токсичні чинники здатні індукувати в рослинних клітинах інтенсивний окислювальний стрес, головним проявом якого є надмірне утворення активних форм кисню (АФК). До найбільш реакційноздатних таких молекул належать супероксид-аніон (O_2^-) та пероксид водню (H_2O_2), які здатні ушкоджувати практично всі типи біомолекул — від білків і нуклеїнових кислот до структурних компонентів клітинних мембран.

АФК, взаємодіючи з органічними речовинами, спричиняють утворення гідропероксидів білків, ліпідів та ДНК (ROOH). Ці сполуки, як і первинні пероксиди, мають високу хімічну активність і в ході подальших перетворень зазнають розщеплення з утворенням альдегідів, спиртів, епоксидів та широкого спектра вторинних окислених продуктів. Особливо інтенсивно процеси перекисного окиснення розвиваються в поліненасичених жирних кислотах ліпідних мембран, де АФК ініціюють ланцюгові реакції з утворенням пероксильних, алкоксильних та інших радикальних форм.

Залучення важких металів змінної валентності, таких як Fe, Cu чи Co, призводить до прискорення та розгалуження цих ланцюгових реакцій, посилюючи структурну деструкцію мембран. Унаслідок перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ) утворюються кінцеві метаболіти, серед яких малоновий диальдегід, етан і пентан – показові маркери ушкодження мембран, що визначаються, зокрема, через взаємодію з тіобарбітуровою кислотою.

ПОЛ може бути одним із перших механізмів швидкої клітинної відповіді на дію стресових факторів. За нормальних умов у рослинній клітині підтримується певний, базовий рівень перекисного окислення, що

врівноважений роботою багаторівневої антиоксидантної системи. Порушення цього балансу під впливом несприятливих чинників є сигналом активації стрес-асоційованих метаболічних зрушень.

Встановлено, що швидкість і масштаб підсилення ПОЛ є видоспецифічними та можуть слугувати індикаторами стійкості видів до забруднювачів. Для чутливих рослин характерна значна інтенсифікація перекисних процесів, тоді як у стійких видів рівень кінцевих продуктів ПОЛ зростає незначно та швидко стабілізується завдяки високій ефективності антиоксидантних механізмів.

Середні значення інтенсивності перекисного окиснення ліпідів у досліджених групах рослин наведено на рис. 10.

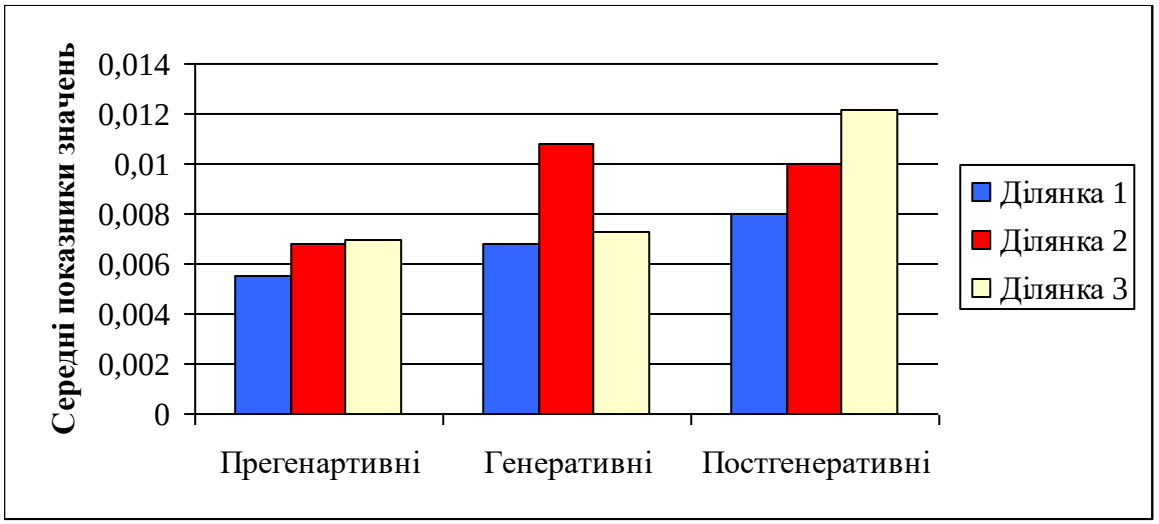


Рис. 3.10 Порівняльні середні показники інтенсивності перекисного окиснення ліпідів у рослин *Plantago major L.* на дослідних майданчиках

У лабораторному експерименті було проведено аналіз інтенсивності перекисного окиснення ліпідів, що дозволило оцінити реактивність *Plantago major* за умов різного рівня антропогенного навантаження. Отримані результати свідчать, що подорожник великий загалом належить до групи відносно стійких видів, здатних підтримувати про-антиоксидантний баланс у межах адаптивної норми. Водночас виявлено суттєві відмінності між віковими станами особин.

Найбільш показовими виявилися генеративні рослини, у яких зафіксовано помітне зростання рівня ПОЛ на ділянці № 2 (парк ім. Т. Г. Шевченка). Підвищення інтенсивності перекисних процесів у цієї вікової групи можна трактувати як специфічну відповідь на підвищений антропогенний вплив, що відображає активізацію стресових механізмів.

На відміну від них, прегенеративні рослини, які перебувають у фазі формування морфофізіологічних структур, виявляють підвищену чутливість, оскільки поєднують дію зовнішніх стресорів із внутрішнім фізіологічним навантаженням розвитку. Постгенеративні особини, для яких характерне поступове уповільнення метаболізму та зростання процесів сенесценції, також демонструють посилення ПОЛ. Це зумовлено природним зниженням ефективності антиоксидантної системи та може розглядатися як стрес-реакція, пов’язана з віковими змінами.

Результати морфометричного та біохімічного аналізу *Plantago major* засвідчили високу чутливість виду до змін екологічних умов та рівня антропогенного навантаження. У рослин, що зростають на території з мінімальним техногенним впливом (майданчик № 3), фіксуються максимальні значення всіх ключових морфометричних параметрів — довжини та ширини листкової пластини, довжини черешка та квітконосу, що відображає стабільні умови середовища та низький рівень стресу. Натомість на урбанізованих майданчиках, особливо на ділянці № 2, спостерігається істотне зниження морфометричних показників, що корелює з підвищеним рівнем перекисного окиснення ліпідів, яке інтерпретується як стрес-індукована реакція на антропогенний тиск. Сукупність отриманих даних свідчить про значний індикаторний потенціал *Plantago major* та підтверджує доцільність його використання як ефективного фітотест-об’єкта для оцінки стану урбанізованих екосистем.

РОЗДІЛ 4

ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ФІТОТЕСТУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ *PLANTAGO MAJOR* В СИСТЕМУ МОНІТОРИНГУ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

Посилення техногенного та рекреаційного навантаження на міські екосистеми потребує впровадження ефективних, маловартісних та науково обґрунтованих методів контролю стану довкілля. Традиційні хімічні методи моніторингу атмосферного повітря та ґрунтів є ресурсомісткими, потребують спеціалізованого обладнання, значних витрат часу та коштів.

У цьому контексті використання *Plantago major* як фітотест-об’єкта є економічно доцільним, оскільки метод не вимагає дорогих лабораторних систем, а аналіз базується на морфометричних показниках та базовому біохімічному тесті (ПОЛ). Таким чином, знижується собівартість екологічного контролю без зменшення його інформативності.

Традиційні методи оцінювання стану урбанізованих територій включають:

— хімічний аналіз ґрунтів на важкі метали;
— інструментальне вимірювання забруднювачів повітря;
— лабораторні спектрофотометричні та хімічні методи;
— токсикологічні біотести.

Таблиця 4.1

Середні витрати на традиційний моніторинг (цифри орієнтовні та використовуються для економічних розрахунків):

Вид робіт	Орієнтовна вартість
Хімічний аналіз 1 проби ґрунту	800–1200 грн
Визначення важких металів (Pb, Cd, Zn, Cu) — 1 проба	1500–2200 грн

Спектрофотометричний аналіз (NO_2, SO_2)	700–900 грн
Відбір проб та експедиційні роботи	1200–1800 грн/день
Лабораторний біотест (Daphnia, Lemna)	500–900 грн

Таким чином, моніторинг однієї міської ділянки з повним набором аналізів коштує від 8000 до 15000 грн, що значно обмежує частоту досліджень.

Запропонований метод базується на:

— морфометричному аналізі (довжина листа, ширина, довжина черешка, квітконосу);

— визначенні інтенсивності перекисного окислення ліпідів (ПОЛ).

Для проведення досліджень необхідні:

— стандартні біологічні інструменти (лінійка, штангенциркуль, лабораторний посуд);

— реактиви для ПОЛ (ТБК-реакція);

— мінімальне технічне забезпечення лабораторії.

Таблиця 4.2

Розрахунок витрат

Стаття витрат	Орієнтовна сума
Реактиви для визначення ПОЛ на 50 проб	~ 900 грн
Лабораторний посуд та витратні матеріали	~ 300 грн
Інструменти для морфометрії (амортизація)	~ 100 грн
Трудові витрати (2 дні польових робіт + 1 день лабораторних)	~ 1200 грн

Загальна вартість фітотестування на одній ділянці становить ≈ 2500 грн.

Таблиця 4.2

Порівняння витрат

Метод	Середня вартість
Традиційний хімічний моніторинг	8 000–15 000 грн
Фітотестування за допомогою *Plantago major*	2 000–2 500 грн

Економія становить 60–80 %.

Економічна ефективність застосування *Plantago major* як фітотест-об’єкта проявляється передусім у зниженні прямих витрат на моніторинг стану довкілля. Використання рослинного методу дозволяє суттєво скоротити фінансові витрати, оскільки потребує мінімальної кількості обладнання, не вимагає проведення дорогих хімічних аналізів і дає змогу отримувати результати значно швидше. За наявними оцінками, загальна вартість фітоіндикаційного дослідження є у три–п’ять разів нижчою порівняно з традиційними лабораторними методами. Таке істотне зменшення витрат створює можливість для охоплення більшої кількості моніторингових ділянок та підвищує оперативність реагування на зміни екологічної ситуації в урбанізованому середовищі.

Крім прямих економічних переваг, застосування *Plantago major* забезпечує низку непрямих вигод, пов’язаних із раннім виявленням негативних екологічних змін. Своєчасна діагностика деградаційних процесів у зелених насадженнях дає змогу попередити розвиток критичних станів територій та мінімізувати подальші витрати на рекультивацію, відновлення ґрунтів чи ліквідацію наслідків забруднень. Відповідно, бюджети екологічних служб можуть бути розподілені більш раціонально, а рішення щодо природоохоронних заходів – ухвалені точніше, з урахуванням реального стану біотичних компонентів середовища.

Для комплексної оцінки економічної доцільності був розрахований інтегральний показник ефективності, який ґрунтується на порівнянні витрат на традиційний хімічний аналіз та витрат на фітотестування. Припустимо, що стандартне лабораторне дослідження однієї ділянки вимагає близько десяти тисяч гривень, тоді як фітоіндикаційний аналіз тієї самої площі потребує приблизно дві з половиною тисячі гривень. Співставлення цих величин показує, що застосування методу на основі *Plantago major* є приблизно в чотири рази економічно вигіднішим. Це свідчить про значно вищу рентабельність рослинного тестування при збереженні високого рівня інформативності.

Таким чином, впровадження фітотестування на основі *Plantago major* у практику моніторингу урбанізованих територій забезпечує значний економічний виграш, підвищує якість екологічного контролю та сприяє формуванню фінансово обґрунтованої природоохоронної політики.

Узагальнюючи результати економічного аналізу, можна стверджувати, що впровадження фітотестування урбанізованих територій із використанням *Plantago major* є економічно доцільним та ефективним рішенням, яке дозволяє суттєво знизити витрати на екологічний моніторинг порівняно з традиційними хімічними методами. Завдяки низькій собівартості, простоті застосування, мінімальним потребам у спеціалізованому обладнанні та високій інформативності морфометричних і біохімічних показників, метод забезпечує можливість регулярного, оперативного та масштабного контролю стану міського довкілля. Економія коштів у межах 60–80 % дає змогу збільшити кількість обстежуваних територій, своєчасно виявляти екологічні ризики й оптимізувати фінансові ресурси природоохоронних структур, що робить даний підхід важливим інструментом сталого управління урбанізованими екосистемами.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Встановлено, що *Plantago major* є ефективним біоіндикатором антропогенного навантаження, оскільки чутливо реагує на зміни умов середовища як на морфометричному, так і на біохімічному рівнях.

2. Морфометричний аналіз показав чітку залежність розвитку рослин від ступеня антропогенного пресингу. На ділянці з найменшим техногенним впливом (майданчик № 3) усі показники (довжина та ширина листків, площа листкової пластини, довжина черешка та квітконосу) мали максимальні значення. На урбанізованих майданчиках № 1 і № 2 ці параметри істотно зменшувалися.

3. Найбільша морфометрична пластичність спостережена у генеративних особин, що свідчить про високу адаптивну здатність виду до умов техногенного середовища.

4. Інтенсивність перекисного окиснення ліпідів підтвердила наявність стресових реакцій у рослин, що зростають у найбільш забруднених умовах (майданчик № 2). Генеративні рослини виявили найвищий рівень ПОЛ, що вказує на їхню найбільшу чутливість до екологічного стресу.

5. Прегенеративні та постгенеративні особини також демонстрували підвищення рівня ПОЛ, але ці зміни були зумовлені відповідно: активною фазою формування рослини та віковим зниженням метаболічних процесів.

6. Порівняльний аналіз ділянок довів, що найсприятливіші умови зростання формуються у лісовому масиві (майданчик № 3), тоді як найбільш негативний вплив на рослинні популяції чинять урбанізовані території з інтенсивним рекреаційним використанням.

Для підвищення ефективності екологічного моніторингу та своєчасного виявлення деградаційних процесів у міських екосистемах доцільно впроваджувати методи фітотестування із застосуванням *Plantago major* як доступного та чутливого біоіндикатора, що дозволить розширити мережу спостережень, оптимізувати витрати на екологічний контроль, підвищити

якість прийняття управлінських рішень і забезпечити своєчасне планування природоохоронних заходів спрямованих на стабілізацію стану урбанізованих територій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.

1. . Гогіташвілі Г.Г. Основи охорони праці : навч. посібник для студ. вищих навч. закладів . Лапін. 4-тє вид., випр. та доп . К.: Знання, 2008 . 231с.

2. Волошин І. М. Ландшафтно-екологічні основи моніторингу. Л.: Простір М, 1998. 356 с.

3. Di Stasio L., Gentile A., Tangredi D. N. та ін. Urban Phytoremediation: A Nature-Based Solution for Environmental Reclamation and Sustainability. *Plants*, 2025. 14, 2057.

4. Грищук М.В. Основи охорони праці: Підручник для студ. вищих навч. закладів. К.: Кондор, 2005. – 240 с.

5. Gong C., Ma H., Zhang L. та ін. Role of urban vegetation in air phytoremediation. – *npj Urban Sustainability*, 2023.

6. Безсонова В. П., Шиян Н. Г. Фітоіндикація та фітомоніторинг стану довкілля : навч. посіб. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2024. 156 с.

7. Моніторинг довкілля : навч. посіб. : у 2 ч. Ч. 1. Київ : Вид-во Європ. ун-ту, 2007. 273 с.

8. Національні доповіді про стан навколишнього природного середовища в Україні за 2000–2013 рр. Київ : Міністерство охорони навколишнього природного середовища України, 2001–2014

9. Національна доповідь про стан техногенної та природної безпеки в Україні. Київ : Чорнобильінтерінформ, 2005. – 322 с.

10. Ханнанова О. Р., Арканова А. А. Биоиндикационная оценка состояния атмосферного воздуха Полтавского городского парка. Біологія та екологія. 2017. Т. 3, № 1–2. С. 69–75.

11. Довідник з питань економіки та фінансування природокористування і природоохоронної діяльності. Київ : Геопринт, 2000. 411 с.

12. Інформаційний бюлетень про стан геологічного середовища України. Вип. 16. Київ : Геоінформ, 2000. 193 с.

13. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Моніторинг та методи захисту довкілля» (для спеціальності «Комп'ютерний еколого-економічний моніторинг). Київ : НТУУ «КПІ», 2003.

Клименко М.О., Прищепа А.М., Вознюк Н.М. Моніторинг довкілля: Підручник. К., 2016. 196 с.

14. Козловський В. О. Техніко-економічне обґрунтування і економічні розрахунки в дипломних проектах і роботах. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2003. 75 с.

15. Rabiee M., Hosseini S. M., et al. Phytoremediation Potential of Urban Trees in Mitigating Air Pollution: Case Study of Tehran. – *Forests*, 2024.

16. Кондратюк С.Я., Мартиненко В.Г. Ліхеноіндикація: Посібник / Кіровоград, 2006. 208 с.

17. Samir A., Popa V., et al. Phytoremediation potential of native plants: Biomonitoring of chemical pollutants in soils and plants. – *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 2023.

18. Мерленко І.М., Музиченко О.С.. Моніторинг довкілля. Лабораторний практикум до виконання занять для студентів спеціальності 6.070800– «Екологія та охорона навколишнього середовища» денної та заочної форми навчання. Луцьк, 2017. 176 с. Брайон О. В., Кузьменко М. І. Біомоніторинг стану довкілля : навчальний посібник. Київ : КНЕУ, 2018. 212 с.

19. Григор'єва Л. М., Коваленко О. М. Основи екології та моніторингу довкілля : навч. посіб. Київ : Кондор, 2019. 256 с.

20. Мельник В. І., Книш І. М. Сучасні методи біоіндикації техногенного забруднення. Львів : Сполом, 2020. 144 с.

21. Шевчик В. Г., Барановська О. В. Екологічний контроль та моніторинг. – Київ : Центр учбової літератури, 2020. 318 с.

22. Ємець А. І., Бойко І. М. Фізіологічні основи стійкості рослин до техногенного забруднення. Харків : НУХТ, 2021. 190 с.

23. Куценко М. В., Нестеренко В. М. Урбоекологія : монографія. Дніпро : Ліра, 2021. 280 с.

24. Маринич О. М., Гнатюк О. П. Екологічний моніторинг урбанізованих територій: теорія і практика. Київ : Наукова думка, 2018. 172 с.

25. Плахотнік О. В. Фітотестування і біотестування в оцінці забруднення навколишнього середовища : методичний посібник. Полтава : ПНПУ, 2022. 88 с.

26. Найдьонова О. В., Козаченко Л. В. Біоіндикація як інструмент екологічної оцінки стану урбанізованих екосистем. Київ : Ліра-К, 2023. 130 с.

27. Кузьміна Т. М., Войтюк Ю. Г. Антропогенний вплив на рослинні угруповання: методи аналізу і моніторингу. – Київ : Кондор, 2022. 164 с.

28. Celletti S., et al. The potential of nature-based solutions for urban soils. – *Frontiers in Environmental Science*, 2025.

29. Фесюк В.О. Сучасний екологічний стан та перспективи екологічно безпечного стійкого розвитку Волинської області: кол.моногр. К.:ТОВ «Підприємство «Ві Ен Ей»: 2016. 316 с.

30. Якимчук А.Ю. Економічний механізм здійснення природоохоронної діяльності: український та зарубіжний досвід. *Вісник НУВГП*. Рівне, 2014. Вип. 4 (28). С. 16–23.

31. Яцишин А.В. Використання інформаційних технологій в задачах управління екологічною безпекою / *Праці Одеського політехнічного університету*. 2013. Вип. 2(41). С. 289– 294.

32. Соломаха В. А. Фітоіндикація екологічних факторів : монографія**.** Київ : Фітосоціоцентр, 2018. 284 с.

33. Прядко О. В., Гаврилюк Т. В. Екологічний стан урбанізованих територій та методи його оцінювання. Житомир : Вид-во ЖДУ, 2019. 152 с.

34. Гудзь С. П., Клименко М. О. Біогеохімічний моніторинг забруднення ґрунтів важкими металами. Львів : Сполом, 2020. 164 с.

35. Бойко М. Ф., Тарасов В. В. Урбофлора України: структурні та екологічні особливості. Херсон : Олді-плюс, 2017. 320 с.

36. Шеляг-Сосонко Ю. Р., Дідух Я. П. Екологія та фітоіндикація : навчальний посібник. Київ : Наукова думка, 2017. 240 с.

37. Burden Franck R., Mckelvie Ian, Forstner Ulrich, Guernther Alex. Environmental Monitoring Handbook. 2017. 1100 p.

38. Busch David E., Trexler Joel C. Monitoring Ecosystems. Interdisciplinary Approaches for Evaluating Ecoregional Initiatives. Island Pr. 2012. 447 p.

39. Dahl Lyon. Edited by Tomas Hak, Bedrich Moldan. Sustainability indicators. Island Pr. 2007. 436 p.

40. James A. Jahnke. Continuous Emission Monitoring. Second edition. 2011. 320 p.

ДОДАТКИ

Додаток А