

Міністерство освіти і науки України
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
Міністерство освіти і науки України
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Бородай Євгенія Сергіївна

УДК 581.1

**ДИСЕРТАЦІЯ
ІНТЕГРОВАНА ВІДПОВІДЬ ГАЗОННИХ ТА КВІТКОВО-
ДЕКОРАТИВНИХ РОСЛИН ЗА УМОВИ МЕГАПОЛІСУ НА ФОНІ
ЗМІН КЛІМАТУ**

091 Біологія

09 Біологія

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Бородай Є. С.

_____ (підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Лихолат Юрій Васильович,
доктор біологічних наук, професор

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Бородай Є. С. - Інтегрована відповідь газонних та квітково-декоративних рослин за умови мегаполісу на фоні змін клімату – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 091 Біологія. – Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, 2026.

Актуальність нашого дослідження зумовлена тим, що сучасні урбофітоценози Степової зони України опинилися в умовах подвійного екологічного тиску: стрімкі кліматичні зміни (зростання середньорічних температур, дефіцит опадів, тенденція до аридизації) та хронічне техногенне навантаження на урбоекосистеми, спричинене викидами автотранспорту та промислових підприємств. У цих умовах значну роль у нейтралізації забруднювачів відіграють зелені рослини, які в міському середовищі виконують низку екологічних, соціальних, кліматичних та естетичних функцій. Можливість використання їх в декоративних насадженнях в міському озелененні визначається вимогами до умов місця зростання і ступенем негативного впливу на них факторів середовища.

Саме тому дослідження *інтегрованої фізіолого-біохімічної відповіді* на сумісну дію кліматичної аридизації та урбаногенного навантаження декоративних та газонних трав'янистих видів, оцінка стабільності їхньої антиоксидантної системи та виявлення найбільш перспективних стійких видів є актуальним науково-практичним завданням для екологічної оптимізації мегаполісу.

Дане дослідження проводилось на території міста Дніпро, обласного центру Дніпропетровської області України - розвинутого багатофункціонального мегаполісу, що є центром міської агломерації, промисловим і транспортним вузлом південного сходу України. Для відбору

дослідних проб було обрано такі ділянки в межах міста Дніпро: Ботанічний сад ДНУ як умовний контроль; проспект Богдана Хмельницького та вулиця Набережна Перемоги, як зони, що характеризуються високою інтенсивністю автотранспортного руху; зона Придніпровської ТЕС та зона ПрАТ «ДМЗ», як ділянки, де фіксується значний рівень забруднення як повітря так і ґрунту.

На основі аналізу асортименту видів, що використовують в озелененні міста Дніпро, об'єктами дослідження були обрані такі види квітково-декоративних рослин *Tagetes erecta* L., *Calendula officinalis* L., *Petunia* × *hybrida* Vilm., *Mirabilis jalapa* L., *Iris* × *hybrida hort.*, *Chrysanthemum* × *koreanum hort.*, *Aster dumosum* L. Та відповідно газонних рослин: *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Setaria viridis* (L.) P. Beauv., *Festuca valesiaca* L., *Poa angustifolia* L. Відбір рослинного матеріалу здійснювали протягом всього періоду вегетації, що дозволило простежити динаміку фізіолого-біохімічної відповіді рослин.

Вміст важких металів в рослинних зразках досліджували методом атомно-адсорбційної спектрофотометрії за стандартною методикою, вимірювання проводили на спектрофотометрі ААС 30.

Аналіз пігментного складу листових пластин досліджуваних видів проводився на спектрофотометрі Spectroquant Prove 300 UV/VIS (Merck KGaA, Німеччина), а обчислення їх концентрації - за загальноприйнятими рівняннями.

Активність антиоксидантних ферментів, МДА та проліну визначали спектрофотометричними методами за загальноприйнятими методиками з використанням відповідних розрахункових формул.

Статистичний аналіз проводили за допомогою пакету програм Microsoft Excel та програми SPSS for Windows.

Комплексний аналіз фізіолого-біохімічних показників квітково-декоративних рослин показав тісний взаємозв'язок між накопиченням важких металів, розвитком оксидативного стресу та активацією антиоксидантної системи. Підвищення рівня МДА супроводжується зростанням активності

СОД і пероксидази, а також накопиченням проліну, що свідчить про формування адаптаційної відповіді. Водночас спостерігається зниження вмісту хлорофілів, що вказує на пригнічення фотосинтетичних процесів.

Отримані дані свідчать про те, що досліджувані види рослин по-різному реагують на вплив техногенного навантаження, що проявляється у зміні фізіолого-біохімічних показників. Підвищення коефіцієнтів транслокації важких металів у дослідних варіантах вказує на інтенсивніше надходження металів у надземні органи рослин. Найвищі значення характерні для *Tagetes erecta* та *Chrysanthemum × koreanum*, що може свідчити про їх високу здатність до акумуляції.

У результаті дослідження встановлено, що у більшості досліджуваних видів рослин в умовах дослідних ділянок спостерігається підвищення вмісту проліну порівняно з контрольними значеннями. Найбільш виражене накопичення проліну відзначено у *Chrysanthemum × koreanum*, *Tagetes erecta* та *Calendula officinalis*, що свідчить про активізацію адаптаційних механізмів у відповідь на дію стресових факторів середовища. Менш виражені зміни зафіксовані у *Petunia hybrida* та *Mirabilis jalapa*, що може свідчити про нижчий рівень адаптивної реакції або використання альтернативних механізмів захисту.

Зі зростанням вмісту металів спостерігається підвищення рівня малонового діальдегіду, що є показником оксидативного стресу. Це свідчить про ушкодження клітинних мембран внаслідок інтенсифікації процесів перекисного окиснення ліпідів. Одночасно виявлено підвищення вмісту проліну, що виконує роль осморегулятора та антиоксиданту. Це свідчить про активацію адаптаційно-захисних механізмів рослин у відповідь на стресові фактори в умовах антропогенної трансформації. Зниження вмісту хлорофілів а і b у дослідних варіантах підтверджує пригнічення фотосинтетичної активності. Водночас збільшення частки каротиноїдів вказує на їх участь у захисті фотосинтетичного апарату від пошкодження.

Кореляційний аналіз показників підтвердив наявність сильного негативного зв'язку між концентрацією важких металів у біомасі та вмістом суми хлорофілів, а також сильного позитивного зв'язку між накопиченням металів, рівнем МДА та проліном, що маркує важкі метали як провідний деструктивний чинник міського середовища. За характером стабільності ферментативної відповіді (перерахунком коефіцієнтів кореляції r активності СОД) встановлено високу синхронність захисних систем у *Chrysanthemum × koreanum* ($r = 0,77$), *Iris hybrida* ($r = 0,64$) та *Aster dumosum* ($r = 0,61$). Натомість у *Petunia × hybrida* ($r = 0,15$) та *Mirabilis jalapa* ($r = 0,36$) зв'язок є слабким, що доводить десинхронізацію та неспроможність їхнього ферментативного апарату протидіяти стресу.

За розрахованим інтегральним індексом стійкості встановлено чітку диференціацію та розмежовано екологічні стратегії об'єктів. Для квітково-декоративних культур: найвищу біохімічну толерантність та здатність до акумуляції металів продемонстрували багаторічники *Chrysanthemum × koreanum*, *Aster dumosum*, *Iris hybrida* та однорічник *Tagetes erecta*. Критично чутливим видом із низьким адаптивним потенціалом визначено *Petunia × hybrida*, у якої деградація фотосистем супроводжується різким скороченням тривалості цвітіння та дегенерацією декоративних ознак.

Визначено, що газонні злаки мають вищу екологічну пластичність порівняно з квітковими культурами завдяки специфічному бар'єрному механізму - обмеженню транслокації важких металів у надземні органи та їх фітостабілізації у корінні. Еталонами стійкості (низький МДА, стабільні пігменти, потужний ферментативний захист) визначено багаторічники *Elytrigia repens* та *Festuca valesiaca*. *Poa angustifolia* посідає проміжне положення. Однорічний злак *Setaria viridis* виявив високу чутливість саме до хімічного та пилового забруднення промислових екотопів, що проявилось у глибокому падінні вмісту хлорофілів на тлі виснаження антиоксидантної системи.

Встановлено, що у газонних рослин важливим механізмом адаптації є здатність обмежувати транслокацію важких металів у надземні органи та акумулювати їх у кореневій системі. Показано, що *Elytrigia repens* та *Festuca valesiaca* характеризуються високою активністю антиоксидантних ферментів, низьким рівнем МДА та високою стабільністю фізіолого-біохімічних процесів, що свідчить про їх високу стійкість. *Poa angustifolia* демонструє проміжний рівень адаптації, що проявляється у помірному розвитку оксидативного стресу та частковій стабілізації антиоксидантної системи. *Setaria viridis* характеризується підвищеним рівнем оксидативного стресу, гіперактивацією ферментативної системи та значним зниженням вмісту фотосинтетичних пігментів, що свідчить про її високу чутливість до дії техногенних факторів.

Розрахунок інтегрального індексу стійкості показав чітку диференціацію досліджуваних видів рослин за рівнем адаптаційних можливостей. Найвищі значення індексу характерні для *Chrysanthemum × koreanum* та *Tagetes erecta*, що свідчить про високий рівень функціонування антиоксидантної системи. Найнижчий показник встановлено у *Petunia × hybrida*, що підтверджує її чутливість до дії стресових факторів. Інші види займають проміжне положення, демонструючи різний ступінь адаптаційної відповіді.

Результати досліджень використано в науково-практичній роботі як експрес-систему фітоіндикації урбоєкосистем в умовах антропогенної трансформації. Здобуті дані та сформовані рекомендації щодо оптимізації асортименту міських насаджень впроваджено в науково-практичну діяльність Ботанічного саду ДНУ та в навчальні програми на кафедрі фізіології та інтродукції рослин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара: «Оранжерейне та промислове квітництво», «Біологічні основи газоноведення», «Пришкільна навчально-дослідна ділянка та озеленення школи».

Ключові слова: урбофітоценози, урбоекосистема, фіторемедіація, фітоіндикація, кліматичні зміни, аерополітанти, квітково-декоративні інтродуценти, газонні злаки, озеленення, антиоксидантна система, важкі метали, хлорофіли, антропогенна трансформація, мегаполіс, степова зона

ANNOTATION

Borodai Ye. S. - Integrated response of lawn and flower-decorative plants under the conditions of a megalopolis against the background of climate change - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 091 Biology. – Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, 2026.

The relevance of our research is due to the fact that the modern urbophytocenoses of the Steppe zone of Ukraine found themselves under conditions of double environmental pressure: rapid climatic changes (increasing average annual temperatures, precipitation deficit, tendency to aridization) and chronic man-made load urban ecosystems caused by emissions from vehicles and industrial enterprises.

In these conditions, a significant role in the neutralization of pollutants is played by green plants, which in the urban environment perform a number of ecological, social, climatic and aesthetic functions. The possibility of using them in decorative plantings in urban landscaping is determined by the requirements for the conditions of the place of growth and the degree of negative influence of environmental factors on them.

That is why the study of the integrated physiological and biochemical response to the combined effect of climatic aridization and urban load of ornamental and lawn herbaceous species, the assessment of the stability of their antioxidant system and the identification of the most promising resistant species is

an urgent scientific and practical task for the ecological optimization of the metropolis.

This study was conducted on the territory of the city of Dnipro, the regional center of the Dnipropetrovsk region of Ukraine - a developed multifunctional metropolis, which is the center of the urban agglomeration, an industrial and transport hub of southeastern Ukraine. For the selection of experimental samples, the following areas within the city of Dnipro were chosen: the Botanical Garden of DNU as a conditional control; Bohdan Khmelnytskyi Avenue and Naberezhna Peremogy Street, as areas characterized by high traffic intensity; the zone of Prydniprovskaya TPP and the zone of PJSC "DMZ", as areas where a significant level of both air and soil pollution is recorded.

Based on the analysis of the assortment of species used in the landscaping of the city of Dnipro, the following types of flower and ornamental plants *Tagetes erecta* L., *Calendula officinalis* L., *Petunia* × *hybrida* Vilm., *Mirabilis jalapa* L., *Iris* × *hybrida* hort., *Chrysanthemum* × *koreanum* hort., *Aster dumosum* L. and lawn plants, respectively, were chosen as the objects of the study: *Elytrigia repens* (L.) Nevski, *Setaria viridis* (L.) P. Beauv., *Festuca valesiaca* L., *Poa angustifolia* L. The selection of plant material was carried out during the entire vegetation period, which made it possible to trace the dynamics of the physiological and biochemical response of plants.

The content of heavy metals in plant samples was studied by the method of atomic adsorption spectrophotometry according to the standard method, measurements were carried out on an AAS 30 spectrophotometer.

The pigment composition of the leaf plates of the studied species was analyzed on a Spectroquant Prove 300 UV/VIS spectrophotometer (Merck KGaA, Germany), and their concentration was calculated according to generally accepted equations.

The activity of antioxidant enzymes, MDA and proline was determined by spectrophotometric methods according to generally accepted methods using appropriate calculation formulas.

Statistical analysis was performed using Microsoft Excel and SPSS for Windows.

A comprehensive analysis of the physiological and biochemical indicators of flowering and ornamental plants showed a close relationship between the accumulation of heavy metals, the development of oxidative stress and the activation of the antioxidant system. An increase in the level of MDA is accompanied by an increase in the activity of SOD and peroxidase, as well as the accumulation of proline, which indicates the formation of an adaptive response. At the same time, there is a decrease in the content of chlorophylls, which indicates inhibition of photosynthetic processes.

The obtained data indicate that the studied species of plants react differently to the impact of man-made load, which is manifested in changes in physiological and biochemical indicators. An increase in the translocation coefficients of heavy metals in the experimental variants indicates a more intense influx of metals into the aerial organs of plants. The highest values are typical for *Tagetes erecta* and *Chrysanthemum × koreanum*, which may indicate their high accumulation capacity.

As a result of the study, it was established that in the majority of the studied plant species in the conditions of the experimental plots, an increase in the proline content was observed compared to the control values. The most pronounced accumulation of proline was noted in *Chrysanthemum × koreanum*, *Tagetes erecta* and *Calendula officinalis*, which indicates the activation of adaptation mechanisms in response to the action of environmental stress factors. Less pronounced changes were recorded in *Petunia hybrida* and *Mirabilis jalapa*, which may indicate a lower level of adaptive response or the use of alternative defense mechanisms.

With the increase in the metal content, there is an increase in the level of malondialdehyde, which is an indicator of oxidative stress. This indicates damage to cell membranes as a result of intensification of lipid peroxidation processes. At the same time, an increase in the content of proline, which acts as an

osmoregulator and antioxidant, was found. This indicates the activation of adaptive and protective mechanisms of plants in response to stressful factors in conditions of antropogenic transformation. A decrease in the content of chlorophylls a and b in the experimental variants confirms the inhibition of photosynthetic activity. At the same time, an increase in the proportion of carotenoids indicates their participation in the protection of the photosynthetic apparatus from damage.

Correlation analysis of indicators confirmed the presence of a strong negative relationship between the concentration of heavy metals in biomass and the content of the sum of chlorophylls, as well as a strong positive relationship between the accumulation of metals, the level of MDA and proline, marking heavy metals as a leading destructive factor of the urban environment. According to the nature of the stability of the enzymatic response (calculation of correlation coefficients r of SOD activity), a high synchronicity of defense systems was established in *Chrysanthemum × koreanum* ($r = 0.77$), *Iris hybrida* ($r = 0.64$) and *Aster dumosum* ($r = 0.61$). On the other hand, in *Petunia × hybrida* ($r = 0.15$) and *Mirabilis jalapa* ($r = 0.36$), the relationship is weak, which proves desynchronization and inability of their enzymatic apparatus to counteract stress.

According to the calculated integral index of sustainability, a clear differentiation was established and environmental strategies of objects were demarcated. For flower and decorative crops: perennials *Chrysanthemum × koreanum*, *Aster dumosum*, *Iris hybrida* and annual *Tagetes erecta* demonstrated the highest biochemical tolerance and ability to accumulate metals. *Petunia × hybrida* is defined as a critically sensitive species with a low adaptive potential, in which the degradation of photosystems is accompanied by a sharp reduction in the duration of flowering and the degeneration of decorative features.

It was determined that lawn phytocenoses have higher ecological plasticity compared to flower crops due to a specific barrier mechanism - limiting the translocation of heavy metals to above-ground organs and their phytostabilization in the root. Perennials *Elytrigia repens* and *Festuca valesiaca* have been defined as resistance benchmarks (low MDA, stable pigments, powerful enzymatic

protection). *Poa angustifolia* occupies an intermediate position. The annual *Setaria viridis* showed a high sensitivity to chemical and dust pollution of industrial ecotopes, which was manifested in a deep drop in the content of chlorophyll against the background of exhaustion of the antioxidant system.

It was established that an important mechanism of adaptation in lawn plants is the ability to limit the translocation of heavy metals to above-ground organs and accumulate them in the root system. It is shown that *Elytrigia repens* and *Festuca valesiaca* are characterized by high activity of antioxidant enzymes, low level of MDA and high stability of physiological and biochemical processes, which indicates their high stability. *Poa angustifolia* shows an intermediate level of adaptation, manifested in moderate development of oxidative stress and partial stabilization of the antioxidant system. *Setaria viridis* is characterized by an increased level of oxidative stress, hyperactivation of the enzymatic system and a significant decrease in the content of photosynthetic pigments, which indicates its high sensitivity to the action of man-made factors.

The calculation of the integral index of resistance showed a clear differentiation of the investigated plant species according to the level of adaptation capabilities. The highest values of the index are characteristic of *Chrysanthemum × koreanum* and *Tagetes erecta*, which indicates a high level of functioning of the antioxidant system. The lowest indicator was found in *Petunia × hybrida*, which confirms its sensitivity to stress factors. Other species occupy an intermediate position, showing varying degrees of adaptive response.

The research results are used in scientific and practical work as an express system of phytoindication of urboecosystems in conditions of anthropogenic transformation. The obtained data and formed recommendations regarding the optimization of the range of urban plantings were implemented in the scientific and practical activities of the Botanical Garden of DNU and in the educational programs at the Department of Physiology and Introduction of Plants of Oles Honchar Dnipro National University: "Greenhouse and industrial floriculture",

"Biological basics of lawn maintenance", "Pre-school educational and experimental site and school landscaping".

Key words: urbophytocoenoses, urboecosystem, phytoremediation, phytoindication, climate change, aeropollutants, floral and decorative introducents, lawn grasses, greening, antioxidant system, heavy metals, chlorophylls, anthropogenic transformation, metropolis, steppe zone.

Список публікацій здобувача, в яких висвітлено основні наукові результати дисертації.

У виданнях, які включені до наукометричних баз Web of Science та Scopus:

1. Alexeyeva, A. A., Lykholat, Y. V., Khromykh, N. O., Kovalenko, I. M., & **Boroday, E. S.** (2016). The impact of pollutants on the antioxidant protection of species of the genus *Tilia* at different developmental stages. *Visnyk of Dnipropetrovsk University, Biology, Ecology*, 24(1), 188–192.

DOI: <https://doi.org/10.15421/011623>

<https://ecology.dp.ua/index.php/ECO/article/view/011623> (**Web of Science**)

(особистий внесок **Boroday, E. S.**: проведення експериментального дослідження; Alexeyeva, A. A. збір та обробка біо-морфологічних, фітоценотичних даних, написання статті; Lykholat Y. V.: концепція дослідження, формулювання висновків; Khromykh, N. O., загальне керівництво дослідженням, аналіз отриманих результатів; Kovalenko, I. M.,: аналітична обробка даних)

2. Kulbachko Y. L., Boroday Ye. S., Lykholat T. Y., Lykholat O. A., **Kvitko M. O.**, Marenkov O. M., Yevtushenko E. O. Lykholat Y. V. Accumulation of heavy metals by different representatives of biota in the operation zone of the Prydniprovsk thermal power plant. *The Materials of the V International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and*

Economic Matters (ICSF 2024), Kryvyi Rih, Ukraine, May 21–24, 2024. Sustainable Futures in a Changing World – Reflections from the 5th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2024). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1415.

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1415/1/012005>

DOI [10.1088/1755-1315/1415/1/012005](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012005) (Scopus)

(особистий внесок **Boroday Ye. S.**: збір та обробка біо-морфологічних даних, *Kulbachko Y. L.*, збір та обробка зоологічних даних; *Lukholat T. Y.*: проведення експериментального дослідження, аналіз отриманих результатів; *Kvitko M. O.* аналітичний огляд фітоценотичних даних, аналіз отриманих даних; *Lukholat O. A.*: написання статті, формулювання висновків; *Marenkov O. M.*: аналітичний огляд; *Yevtushenko E. O.*: корекція протоколу відбору матеріалів; *Lukholat Y. V.*: концепція дослідження).

Публікації в наукових фахових виданнях України

3. **Бородай Є. С.,** Лихолат Ю. В. Вплив аерополітантив примігстральних територій на активність антиоксидантних ферментів вегетативних органів дерноутворюючих трав. Наукові записки. Біологічні науки (Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя) / за заг.ред.В.І. Шейко.– Ніжин:НДУ ім.М.Гоголя, 2025. № 3. С. 33-43.

DOI: <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2025-BN-3-33-43>

(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка біологічного матеріалу, аналіз результатів, статистична обробка даних, написання статті; *Лихолат Ю. В.*: концепція та дизайн дослідження, формулювання висновків).

4. **Бородай Є. С.,** Лихолат Т. Ю., Лихолат Ю. В. Динаміка активності СОД та накопичення ТБК-активних продуктів у процесі онтогенезу деяких дерноутворюючих рослин в умовах мегаполісу. 2023 *Ecology and Noospherology*, 34(2), 112–116. doi: <https://doi.org/10.15421/032317>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка біологічного, матеріалу, аналітичний огляд, написання статті; Лихолат Т. Ю.: статистична обробка даних, аналіз результатів ; Лихолат Ю.В.: концепція та дизайн дослідження, формулювання висновків).*

5. Домницька І. Л., Лихолат Ю.В., Наумова Т.О., **Бородай Є.С.** Порівняння розеткових та короткостеблових видів Gesneriaceae Dumort., інтродукованих у ботанічний сад Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель. 2022. Том 51. С. 43-71.

DOI <https://doi.org/10.15421/442206>

<https://steppeforestry.dp.ua/index.php/vsllr/article/view/217>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка біологічного матеріалу, аналітичний огляд; Домницька І. Л.: написання статті, аналіз результатів; Наумова Т.О.: статистична обробка даних; Лихолат Ю.В. концепція та дизайн дослідження, формулювання висновків).*

6. Лихолат Ю. В., Білик І. В., **Бородай Є. С.**, Буряк І. Ю. Стійкість високодекоративних квіткових рослин за різних екологічних умов. Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель. 2015. Вип. 44. С. 72-79. http://nbuv.gov.ua/UJRN/pslis_2015_44_15

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка біологічного матеріалу, формулювання висновків, аналітичний огляд; Білик І. В.: статистична обробка даних, написання статті; Лихолат Ю.В.: концепція та дизайн дослідження, корекція протоколу відбору матеріалів,; Буряк І. Ю.: аналіз результатів).*

7. Кабар А. М., Лучка Я. О., Давидов В. Р., **Бородай Є. С.**, Сокур О. В. Активність пероксидази як показник ефективності інтродукції представників гібридогенних плодових кісточкових рослин в умовах Степового Придніпров'я. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2018. Вип. 1.

<https://scireports.com.ua/uk/journals/tom-71-1-2018>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: аналіз результатів, написання статті; Лучка Я. О. збір та обробка біологічного матеріалу, аналітичний огляд; Давидов В. Р.: статистична обробка даних,; Кабар А. М.: концепція та дизайн дослідження, корекція протоколу відбору матеріалів; Сокур О.В.: формулювання висновків).*

8. Кабар А. М., Лихолат Ю. В., Лучка Я. О., Давидов В. Р., **Бородай Є. С.**, Тропанець В. Ю. Активність каталази як показник інтродукції гібридогенних форм кісточкових в умовах Степового Придніпров'я. 2017. Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель. Том 46. С. 92-97. DOI: <https://doi.org/10.15421/441715>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: аналіз результатів, формулювання висновків; Лучка Я. О. написання статті, збір та обробка біологічного матеріалу; Давидов В. Р.: аналітичний огляд; Тропанець В. Ю.: статистична обробка даних,; Кабар А. М.: концепція та дизайн дослідження; Лихолат Ю.В.: корекція протоколу відбору матеріалів).*

9. **Бородай Є. С.**, Лихолат Ю. В., Серга О. І., Григорюк І. П., Сокур О. В.. Зміна морфометричних та фізіолого-біохімічних показників газоутворюючих трав як механізм адаптації до дії важких металів . Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. № 3. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2016_3_3. <https://scireports.com.ua/uk/journals/tom-60-3-2016>

*(особистий внесок **Бородай Є.С.**: написання статті, аналіз результатів; Серга О.І.: формулювання висновків; Сокур О. В. збір та обробка біологічного матеріалу; Григорюк І. П.: аналітичний огляд, статистична обробка даних; Лихолат Ю.В.: концепція та дизайн дослідження; корекція протоколу відбору матеріалів).*

10. Легостаєва Т. В., Григорюк І. П., Лихолат Ю. В., **Бородай Є. С.**, Трусевич Д. А., Ломига Л. Л. Біологічні особливості деяких представників родини Рутових в умовах Ботанічного саду ДНУ. Наукові доповіді

Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. Вип. 6. <https://scireports.com.ua/uk/journals/tom-63-6-2016>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка біологічного матеріалу, аналіз результатів; Легостаєва Т. В. написання статті, формулювання висновків; Григорюк І. П.: аналітичний огляд; Трусевич Д. А.: статистична обробка даних; Лихолат Ю.В.: концепція та дизайн дослідження; Ломига Л. Л. корекція протоколу відбору матеріалів).*

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Lykholat Yu., Lykholat T., **Boroday Eu.**, Sydorova V., Burhovych M. Use of representatives of the genus *Centaurea* L. on the school educational research land plot. Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference. Florence, Italy. 2025. Pp. 204-207. URL: <https://isg-konf.com/scientific-research-integration-of-science-and-practice-for-effective-development/>

*(особистий внесок **Borodai Eu.**: опрацювання експериментальних матеріалів, аналітичний огляд, аналіз отриманих результатів; Lykholat T.: проведення експериментального дослідження, написання статті; Burhovych M.: статистична обробка даних; Sydorova V: збір та обробка експериментальних даних; Lykholat Yu.: концепція дослідження, формулювання висновків).*

12. Lykholat Y. V., **Boroday Y. S.**, Lykholat T. Y., Kvitko M. O., Lykholat O. A. Lawn-forming grasses in the conditions of an industrial city. 6. BILSEL INTERNATIONAL GORDION SCIENTIFIC RESEARCHES CONGRESS June 01-02, 2025, ANKARA/TÜRKIYE. P. 663. <https://bilselkongreleri.com/wp-content/uploads/6.-BILSEL-INTERNATIONAL-GORDION-CONGRESS-BOOK.pdf>

*(особистий внесок **Borodai Y. S.**: опрацювання експериментальних матеріалів, написання статті; Lykholat T. Y.: проведення експериментального дослідження, аналіз отриманих результатів,; Kvitko M.O.: аналітичний огляд, статистична обробка даних; Lykholat O. A.: збір*

та обробка експериментальних даних; *Lykholat Yu.*: концепція дослідження, формулювання висновків).

13. Лихолат Ю. В., Лихолат Т. Ю., Квітко М. О., **Бородай Є. С.**, Гальченко В. М. Стан та перспективи відновлення рослинного покриву на техногенних територіях. The 31st International scientific and practical conference “Methodological aspects of education: achievements and prospects” (August 06 – 09, 2024) Rotterdam, Netherlands. International Science Group. 2024.P.21–25.URL:<https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2024/08/METHODOLOGICAL-ASPECTS-OF-EDUCATION-ACHIEVEMENTS-AND-PROSPECTS.pdf>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка еколого-біологічного, дендрологічного матеріалу, написання статті; Квітко М. О.: аналітичний огляд, аналіз результатів; Лихолат Ю. В.: формулювання висновків; Лихолат Т. Ю.: статистична обробка даних, концепція та дизайн дослідження; Гальченко В. М.: обробка дендрологічних даних)*

14. Роль інтродукованих штучних деревних насаджень степового Придніпров'я як одного з ключових елементів накопичення забруднення при експлуатації теплоелектростанцій [Електронний ресурс] / М. О. Квітко, Ю. В. Лихолат, О. А. Лихолат, О. М. Маренков, Е. О. Євтушенко, **Є. С. Бородай**, Т. Ю. Лихолат // Безпека людини у сучасних умовах : зб. доп. 16-ї Міжнар. наук.-метод. конф., 6-7 грудня 2024 р. = Human safety in modern conditions : coll. of 16th Intern. Sci. and Methodological Conf., December 6-7, 2024 / відп. за вип. Вамболь С. О. ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Електрон. текст. дані. – Харків, 2024. – С. 93-95.

URI <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/86955>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: оцінка фізіологічних показників життєвості та рівня адаптації інтродуцентів; Квітко М. О.: збір та обробка еколого-біологічного, дендрологічного матеріалу, написання статті, обробка експериментальних даних; Лихолат Ю. В.: формулювання висновків, концепція та дизайн дослідження; Лихолат О. А.: аналіз*

результатів; Маренков О. М.: інтерпретація результатів, екосистемний аналіз; Євтушенко Е. О.: аналіз флористичного складу інтродукованих рослин; Лихолат Т. Ю.: аналітичний огляд, статистична обробка даних).

15. Квітко М., Лихолат О., Лихолат Т., **Бородай Є.**, Лихолат Ю. Значення інтродукції рослин для оптимізації стану деревних екосистем Придніпровського степу України. *Новітні досягнення біотехнології* : матер. VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, Нац. авіаційний ун-т, 21–22 вересня 2023. Київ, 2023. С. 43–44. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-6407.1.18098>

(особистий внесок **Бородай Є.** : аналіз результатів; Квітко М.: збір та обробка еколого-біологічного, дендрологічного матеріалу, написання статті; Лихолат О.: аналітичний огляд, статистична обробка даних; Лихолат Т. Ю.: обробка дендрологічних даних; Лихолат Ю.: концепція та дизайн дослідження, формулювання висновків).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	21
РОЗДІЛ 1. РОЗДІЛ 1. СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ АДАПТАЦІЇ УРБАНОФІТОЦЕНОЗІВ ДО КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН.....	27
1.1. Сучасний стан проблеми.....	27
1.2. Специфіка екологічних стресорів мегаполісу.....	29
1.3. Молекулярно-біохімічні механізми адаптації та біомаркери інтегрованого стресу.....	32
РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	38
2.1 Фізико-географічна характеристика району дослідження.....	38
2.2. Об'єкти дослідження.....	40
2.3 Характеристика дослідних ділянок.....	43
РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	46
3.1 Визначення активності СОД.....	46
3.2 Визначення активності пероксидази.....	46
3.3 Визначення активності каталази.....	48
3.4 Визначення вмісту ТБК-активних продуктів.....	49
3.5 Визначення вмісту металів.....	50
3.6 Визначення вмісту проліну.....	52
3.7 Кількісне визначення хлорофілів та каротиноїдів.....	53
РОЗДІЛ 4 ФІЗІОЛОГО-БІОХІМІЧНІ МЕХАНІЗМИ ІНТЕГРОВАНОЇ ВІДПОВІДІ ГАЗОННИХ РОСЛИН НА СТРЕСОВІ ФАКТОРИ.....	55
4.1. Функціонування антиоксидантної системи як показник інтегрованого стресу.....	55
4.2 Інтенсивність процесів пероксидного окиснення ліпідів у вегетативних органах <i>Setaria viridis</i> , <i>Elytrigia repens</i> та <i>Poa angustifolia</i> , що зростають в умовах мегаполісу.....	59
4.3 Сезонна динаміка активності супероксиддисмутази у листках і коренях дерноутворюючих трав за хронічного техногенного стресу.....	63

4.4 Хронічний вплив аерополітантів приміагістральних і промислових територій на активність каталази вегетативних органів пирію повзучого, мишію зеленого і костриці валійської.....	68
4.5. Зміни пероксидазної активності у вегетативних органах дероноутворюючих трав, що зростають у фітоценозах промислових і автомагістральних територій.....	72
4.6 Акумуляція та розподіл важких металів в компонентах урбанізованих екосистем	77
Висновки до розділу 4.....	84
РОЗДІЛ 5 СТІЙКІСТЬ КВІТКОВО-ДЕКОРАТИВНИХ РОСЛИН.....	85
5.1 Квітково-декоративні рослини за дії антропогенного навантаження.....	85
5.2. Видові особливості квітково-декоративних рослин до акумуляції важких металів.....	88
5.3 Зміна вмісту фотосинтетичних пігментів та активності антиоксидантної системи квітково-декоративних рослин.....	96
Висновки до розділу 5.....	103
ВИСНОВКИ.....	104
СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	106
ДОДАТКИ.....	134

ВСТУП

Актуальність теми. Урбанізовані території Степової зони України, зокрема великі промислові центри Придніпров'я, зазнають потужного синергічного тиску: з одного боку - хронічного поліметалічного забруднення від підприємств металургії та теплоенергетики, з іншого - прогресуючих глобальних та регіональних змін клімату (атмосферна й едафічна аридизація, посилення ефекту «міського теплового острова») [1, 2, 3]. Провідним елементом підтримання екологічної стабільності, оптимізації мікроклімату та збереження естетичної привабливості міського середовища є об'єкти озеленення, серед яких важливе місце посідають газонні злаки та квітково-декоративні інтродуценти [14, 16, 22].

Проте успішне функціонування урбофітоценозів обмежується ксенобіотичним пресингом та гідротермічним стресом, які викликають порушення первинних процесів фотосинтезу, інтенсифікацію перекисного окиснення ліпідів (ПОЛ) та деструкцію пігментного комплексу. Складність прогнозування стійкості міських насаджень полягає у відсутності комплексних порівняльних даних щодо фізіолого-біохімічних стратегій (ексклюзії чи акумуляції металів) та компенсаторного потенціалу антиоксидантних систем у рослин з різною тривалістю життєвого циклу [47, 50, 55].

У зв'язку з цим, комплексне оцінювання інтегрованого екологічного стресу та обґрунтування асортименту стійких інтродуцентів для кліматично оптимізованого озеленення промислового мегаполісу є надзвичайно актуальним фітоекологічним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи кафедри фізіології та інтродукції рослин ДНУ «Інтродукція рідкісних, реліктових природних видів рослин і малопоширених сортів культурних рослин в умовах Степового Придніпров'я» (№ 0122U001454, виконання період 2022-2024 рр.), «Дослідження механізмів адаптації інвазійних деревних рослин до

умов Степового Придніпров'я», (№ 0125U002200, виконання період 2025-2027 рр.).

Частина експериментальних досліджень виконана відповідно до програми DAAD «DAAD - OSTPARTNERSCHAFTEN» («Evaluation of changes in the physiological and biochemical status of plants (pigments, proline and malondialdehyde content) caused by salt and oxidative stress») у 2025 р. на базі технічного університету «Фрайберзька гірнична академія», в лабораторії екології Інституту Біологічних наук, в якій автор брав участь як виконавець.

Мета і завдання дослідження.

Мета: Визначити особливості накопичення, компартменталізації та транслокації важких металів у вегетативних органах газонних злаків і квітково-декоративних рослин та з'ясувати фізіолого-біохімічні механізми адаптації їхнього пластидного й антиоксидантного комплексів до умов синергічного техногенно-кліматичного навантаження промислового міста.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати особливості валового вмісту та розподілу важких металів (Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) у системі «грунт - корінь - листя» для модельної групи газонних злаків та квітково-декоративних рослин в різних функціональних зонах м. Дніпро.
2. Розрахувати коефіцієнти транслокації ТФ екотоксикантів та диференціювати досліджені таксони за типами екологічних стратегій взаємодії із пулом важких металів субстрату (аккумулятори, виключники, індикатори).
3. Оцінити стан пластидного комплексу рослин (вміст хлорофілів а, b, каротиноїдів та їхні співвідношення) за умов різного ступеня антропогенного тиску та проаналізувати процеси фотодеструкції світлозбиральних антени.

4. Дослідити рівень розвитку оксидативного стресу в тканинах інтродуцентів за динамікою накопичення малонового діальдегіду (МДА).
5. Визначити активність ферментативної (супероксиддисмутаза, пероксидаза) та неферментативної (вільний пролін) ланок антиоксидантного захисту рослин уздовж градієнту забруднення.
6. На основі багатовимірного статистичного аналізу та кореляційних зв'язків виявити найбільш інформативні біомаркери інтегрованого стресу та обґрунтувати рекомендації щодо оптимізації асортименту рослин для міського озеленення.

Об'єкт дослідження - Процеси техногенно-кліматичної адаптації та фізіолого-біохімічного реагування газонних злаків і квітково-декоративних рослин в урбанізованому середовищі.

Предмет дослідження - Концентрація важких металів, коефіцієнти транслокації, вміст пластидних пігментів, рівень МДА, проліну та активність антиоксидантних ферментів у тканинах *Poa angustifolia*, *Elytrigia repens*, *Festuca valesiaca*, *Setaria viridis*, *Chrysanthemum × koreanum*, *Iris hybrida*, *Petunia × hybrida*, *Aster dumosum* за умов поліметалічного забруднення та аридизації.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше досліджено комплексну інтегровану відповідь трав'янистих рослин (газонних та квітково-декоративних) в умовах урбанізованого середовища на фоні кліматичних змін на основі аналізу фізіолого-біохімічних показників. Встановлено специфіку функціонування систем антиоксидантного захисту трав'янистих рослин разом із здатністю до акумуляції важких металів за умов комбінованого впливу аридизації та антропогенного навантаження мегаполісу.

Вдосконалено та доповнено:

- відомості про адаптивний потенціал основних видів газонних та квітково-декоративних рослин до антропогенного забруднення;

- відомості про роль головних фізіолого-біохімічних маркерів рослин у відповідь на стрес, таких як пігментний склад, вміст проліну та МДА, активність антиоксидантних ферментів;

- підходи до оцінки стану досліджуваних рослин за умов забруднення аерополітантами в несприятливих умовах урбанізованого середовища.

Набули подальшого розвитку:

- **уявлення про механізми формування екологічної стійкості** газонних злаків та квітково-декоративних рослин в урбанізованому середовищі Степової зони України. Доведено, що стратегія толерантності багаторічних інтродуцентів та газонних трав-виключників за умов поліметалічного забруднення базується на ефективній підземній фітостабілізації токсикантів у поєднанні з превентивною інтенсифікацією синтезу каротиноїдів, які виконують роль провідного фотопротекторного «екрана» для світлозбиральних комплексів хлоропластів.

- **наукові положення щодо видоспецифічності компартменталізації** важких металів у системі «субстрат - корінь - листя». Розширено уявлення про бар'єрну функцію корневих систем рослин різних біоморф та типів метаболізму. Показано, що однорічні культури-акумулятори в імпактних промислових зонах зазнають зриву ендогенних бар'єрів, що результується у критичному винесенні міді, нікелю та кадмію в надземні органи та запуску деструктивних процесів пероксидного окиснення ліпідів.

- **методологічні підходи до біомаркерної оцінки інтегрованого стресу** міського середовища. Поглиблено розуміння взаємозв'язку між рівнем акумуляції ксенобіотиків, інтенсивністю накопичення малонового діальдегіду та динамікою накопичення вільного проліну як мультифункціонального протектора. Обґрунтовано використання спряженого коефіцієнта Chl a/b як чутливого індикатора початкових етапів техногенної деградації фотосинтетичного апарату газонних насаджень для завдань екологічного моніторингу промислових мегаполісів.

Практичне значення отриманих результатів.

Результати роботи є теоретичною основою для розробки та впровадження концепції кліматично оптимізованого і техногенно стійкого озеленення великих промислових міст Степової зони України.

- Виділені види-виключники (*Festuca valesiaca*, *Elytrigia repens*, *Chrysanthemum × koreanum*) рекомендовані для створення стійких захисних фітоценозів, газонів уздовж магістралей та фітостабілізації важких металів у зонах імпактного впливу підприємств чорної металургії та ТЕС.
- Види-акумулятори з високою проникністю фізіологічних бар'єрів (*Setaria viridis*, *Petunia × hybrida*) та чутливими біохімічними маркерами (стрімке падіння коефіцієнта Chl a/b, вибухове зростання МДА) запропоновано використовувати як високоефективні тест-системи для фітоіндикації та екологічного моніторингу якості атмосферного повітря й міських едафотопів.
- Матеріали дисертації можуть бути інтегровані у навчальний процес природничих факультетів закладів вищої освіти

Особистий внесок здобувача.

Авторкою дисертації було досліджено сучасний стан проблеми, проаналізовано наукові джерела, відповідно до цього розроблено задачі та план експерименту. Авторка брала участь у відборах та обробці дослідних проб з використанням загальноприйнятих методик, проаналізувала результати дослідження з подальшою підготовкою матеріалів до публікації та апробації отриманих результатів. Науковий доробок авторки дисертаційної роботи сформовано на основі обґрунтування прикладних рішень і науково-практичних рекомендацій, які зазначені у висновках роботи.

Апробація результатів дисертації. Доповіді по матеріалам з отриманими результатами досліджень були представлені до обговорення на щорічних засіданнях кафедри фізіології та інтродукції рослин ДНУ; на

науково-практичних конференціях: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference. Florence, Italy. 2025; BİLSEL INTERNATIONAL GORDİON SCIENTIFIC RESEARCHES CONGRESS June 01-02, 2025, ANKARA/TÜRKİYE; Безпека людини у сучасних умовах : зб. доп. 16-ї Міжнар. наук.-метод. конф., 6-7 грудня 2024 р. = Human safety in modern conditions : coll. of 16th Intern. Sci. and Methodological Conf., December 6-7, 2024; VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, Нац. авіаційний ун-т, 21–22 вересня 2023; Rotterdam, Netherlands. International Science Group. 2024.

Публікації. Матеріали дисертаційної роботи опубліковані в 15 наукових працях, з них 2 - у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Web of Science або Scopus, 8 - у виданнях, які входять до наукових фахових видань України категорії Б, 5 - матеріали у збірниках наукових конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота містить 146 сторінок комп'ютерного тексту, складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Робота містить 3 таблиці та 26 рисунків. Список літератури містить 201 літературне джерело, з яких англійською мовою - 105.

РОЗДІЛ 1. СТАН ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОБЛЕМИ АДАПТАЦІЇ УРБАНОФІТОЦЕНОЗІВ ДО КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН

1.1. Сучасний стан проблеми

Сучасний етап розвитку біосфери характеризується стрімкою трансформацією кліматичних параметрів планети. За даними Міжурядової групи експертів з питань змін клімату (ІРСС), антропогенно обумовлена інтенсифікація парникового ефекту призводить до зміщення кліматичних зон, дестабілізації гідрологічного режиму та суттєвого зростання середньорічних температур повітря [4, 2, 11].

На регіональному рівні, зокрема в межах Степової зони України та Придніпровського промислового регіону, глобальні кліматичні тренди набувають характеру вираженої аридизації (посушливості). Статистичний аналіз метеорологічних даних останніх десятиліть фіксує стабільне підвищення середньої температури вегетаційного періоду на 1,5 - 2°C. При цьому суттєво трансформується режим випадіння опадів: за відносно стабільної річної норми фіксується зміна їхнього характеру. Замість тривалих обложних дощів спостерігаються короткочасні зливи зливого типу (коли місячна норма вологи випадає протягом кількох годин і швидко стікає в зливову каналізацію, не зволожуючи ґрунтовий профіль) на тлі затяжних (понад 30-45 діб) бездощових періодів [36, 37, 48].

Особливого екологічного значення набуває явище «хвиль спеки», коли в літні місяці температура повітря впродовж тижнів утримується на позначках +35°C, що викликає хронічний комбінований (тепловий та водний) стрес у рослинних компонентів урбоекосистем.

Таким чином аналіз літературних джерел свідчить про посилення кліматичного та техногенного навантаження на урбофітоценози [9, 12, 19]. Проте комплексний взаємозв'язок між накопиченням важких металів, зниженням концентрації фотосинтетичних пігментів та активацією антиоксидантних ферментів у газонних та квітково-декоративних рослин

залишається малодослідженим, що обумовлює актуальність і мету нашого дослідження.

В умовах прогресуючих кліматичних змін та хронічного антропогенного навантаження великих промислових центрів Придніпров'я, фітотоксична дія екотоксикантів набуває специфічного синергічного характеру. Надходження іонів важких металів у мезофіл листка є потужним тригером розвитку оксидативного стресу, що виражається в надлишковому генеруванні активних форм кисню (АФК) та інтенсифікації процесів пероксидного окиснення ліпідів (ПОЛ). Сучасні дослідження [7, 40, 44, 73] вказують на те, що первинною мішенню для ксенобіотичного пресингу виступає пластидний комплекс рослин.

Токсична дія метал-іонів реалізується як через пряме інгібування ензимів біосинтезу порфіринів, так і через ізоморфне заміщення центрального атома Mg у молекулі хлорофілу, що призводить до втрати її фотосинтетичної активності та руйнування архітектури світлозбиральних комплексів (СЗК). Водночас тривалість утримання гомеостазу рослинним організмом в урбанізованому середовищі визначається типом його інтегрованої екологічної стратегії. Якщо види-виключники здатні локалізувати основний пул забруднювачів у кореневій системі, мінімізуючи навантаження на асиміляційний апарат, то види-акумулятори зазнають прямого ксенобіотичного впливу на клітини листа, що вимагає мобілізації всього метаболічного потенціалу ферментативної та неферментативної ланок антиоксидантного захисту [22, 45, 48].

Діяльність людини в сучасних умовах створює цілком новий тип геохімічних аномалій. Особливо підвищується вміст у повітрі та ґрунті важких металів, що призводить до негативних наслідків для біосфери. Людина своїми діями викликає в складному природному комплексі різноманітні зміни не тільки в рослинності, але і в абіотичному середовищі, а також у всіх компонентах урбоекосистем. Ці зміни додатково впливають на рослинність, ускладнюючи загальну картину її динаміки.

1.2 Специфіка екологічних стресорів мегаполісу

Міське середовище великого індустріального центру (на прикладі м. Дніпро) виступає потужним модифікатором і підсилювачем кліматичного стресу через формування специфічного комплексу антропогенних чинників [27, 50, 57]:

- Ефект «міського теплового острова»: суцільне запечатування едафотопів асфальтовим та бетонним покриттям, висока щільність забудови та низьке альbedo міських поверхонь призводять до акумуляції сонячної радіації вдень та її інтенсивного випромінювання у нічний час. Як наслідок, температура повітря в урбанізованих каньйонах та вздовж автомагістралей стабільно на 3-6°C вища за природний кліматичний фон регіону.

- Техногенна аеробна та едафічна трансформація: на мікрокліматичний перегрів накладається постійний хімічний пресинг. Викиди підприємств чорної металургії (ПрАТ «ДМЗ») та теплоенергетики (Придніпровська ТЕС) насичують атмосферу фітотоксичними газами та високодисперсним пропиллом [16, 58, 59]. Осідаючи на листках газонних трав, пил запечатує породи, оптично перегріває листову пластину та знижує ефективність фотосинтезу.

- Поліметалічне забруднення урбаноземів: штучні ґрунти міст накопичують рухомі форми як есенціальних елементів (Fe, Mn, Cu, Zn), так і небезпечних ксенобіотиків (Pb, Cd, Ni). Підлужування міських субстратів внаслідок руйнування будівельних матеріалів змінює біодоступність іонів металів, створюючи умови для їхнього неконтрольованого поглинання рослинами на тлі посухи [2, 29, 38].

- Висока інтенсивність автотранспортного руху. До складу автотранспортних викидів входять оксиди азоту (NO, NO₂), оксиди сірки (SO₂), вуглекислий газ (CO₂), чадний газ (CO) леткі органічні сполуки, сажа, пил та важкі метали (Pb, Cd, Zn, Cu) [2, 78, 88]. Ці речовини мають високу реакційну здатність проникати в рослинні тканини, викликаючи морфологічні зміни (зменшення площі листової поверхні, деформації

листіків, вкорочення пагонів та кореневої системи), порушення фізіологічних-біохімічних процесів (пригнічення фотосинтезу, синтезу білків, вуглеводів та ліпідів, надмірне утворення активних форм кисню). Це, в свою чергу, знижує адаптивний потенціал видів, впливає на здатність до самовідновлення [15, 18, 24].

Специфіка примагістральних екотопів м. Дніпро визначається поєднанням кількох деструктивних чинників:

1. Мультикомпонентний хімічний спектр емісій: відпрацьовані гази двигунів внутрішнього згоряння постачають в атмосферу велику кількість оксидів азоту, монооксиду вуглецю, вуглеводнів, а також дисперсних частинок сажі. Крім того, транспортний рух є головним джерелом специфічного поліметалічного забруднення примагістральних урбаноземів [32, 39, 55]. Внаслідок стирання гальмівних колодок, зносу автомобільних шин та корозії деталей у субстрат і на поверхню листя надходять рухомі форми цинку, міді, нікелю, а також залишковий пул свинцю, акумульований за десятиліття використання етилованого бензину.
2. Аерозольний та пиловий пресинг (ефект турбулентності): інтенсивний рух автомобілів викликає постійну механічну турбулентність повітряних мас. Це призводить до постійного перевідкладення (вторинного підняття) придорожного пилу та часток зносу дорожнього покриття. Високодисперсний пил, осідаючи на шорстких листових пластинках, утворює стійку ліпофільну плівку. Цей наліт не лише блокує продишувальний апарат, порушуючи газообмін та транспірацію, а й суттєво знижує альбедо листка, викликаючи його додатковий радіаційний перегрів.
3. Посилення мікрокліматичної аридизації: Автомагістралі виступають потужними лінійними акумуляторами тепла [60, 72, 92]. Суцільне покриття асфальтобетоном з низькою відбивною здатністю призводить до того, що влітку температура дорожнього полотна може сягати

+50+60°C. Це створює постійний висхідний потік гарячого сухого повітря, що різко знижує відносну вологість у зоні газонів (іноді до критичних < 20%). Рослини опиняються в умовах жорсткої повітряної посухи, що на тлі едафічного дефіциту вологи через запечатаність ґрунтів провокує хронічний водний дефіцит.

4. Акумуляція техногенної солі (сольовий стрес) [94, 136, 144]: специфічним стресором приміагістральних територій є зимове використання протиожеледних хімічних реагентів (переважно хлориду натрію). Навесні та влітку ці солі трансформуються в пил або вимиваються у придорожні урбаноземи, викликаючи їхнє вторинне засолення та лужний зсув рН. Це блокує поглинання корінням важливих поживних елементів (наприклад, заліза, перетворюючи його на нерозчинні гідроксиди) і водночас посилює рухливість та біодоступність токсичного кадмію.

Таким чином, специфіка екологічних стресорів сучасного промислового мегаполісу полягає в їхньому комплексному, багатокомпонентному та вираженому синергічному характері дії на рослинний організм. Урбанізоване середовище формує унікальний екологічний пресинг, де хімічний токсикоз (зумовлений поліметалічним забрудненням субстрату та аерогенними емісіями фітотоксичних газів) накладається на жорсткий гідротермічний стрес (зумовлений ефектом «міського теплового острова» та прогресуючою аридизацією Степової зони) [10, 37, 61]. За таких умов класичні монофакторні адаптаційні схеми рослин втрачають свою ефективність. Функціонування урбофітоценозів переходить у режим інтегрованого стресу, де тривалість збереження декоративності та життєздатності трав'янистих рослин визначається не просто стійкістю до окремого забруднювача, а гнучкістю їхньої ендогенної фізіолого-біохімічної системи та здатністю протистояти сумісному техногенно-кліматичному тиску, що обґрунтовує необхідність детального вивчення цих процесів у наступних розділах нашої роботи.

1.3 Молекулярно-біохімічні механізми адаптації до антропогенного забруднення та біомаркери інтегрованого стресу

Синергічна дія посухи, спеки та важких металів запускає в клітинах рослин каскад вільнорадикальних реакцій, що призводить до розвитку оксидативного стресу - надлишкового накопичення активних форм кисню (АФК). У сучасній науковій літературі стан і ступінь уразливості рослинного організму оцінюють за допомогою системи сполучених біомаркерів: деградація пігментного складу, перекисне окиснення ліпідів (ПОЛ), антиоксидантна система (АОС) [63, 70, 71, 91].

В умовах міського середовища АФК - так і як супероксидний аніон-радикал, синглетний кисень, пероксид водню та найбільш деструктивний гідроксильний радикал - утворюються у кількох клітинних компартментах одночасно:

- у хлоропластах: через блокування прорихів пилом та дефіцит вологи знижується інтенсивність фіксації CO_2 . Це призводить до перевідновлення електрон-транспортного ланцюга (ЕТЛ) фотосистеми I, де електроди скидаються безпосередньо на молекулярний кисень (реакція Мелера). Одночасно надлишкова сонячна радіація в умовах спеки викликає триплетне збудження хлорофілу, що трансформує кисень у синглетно-активну форму.

- під дією важких металів: метали зі змінною валентністю (Cu, Fe, Mn), які надходять у мезофіл, безпосередньо ініціюють вільнорадикальні реакції, виступаючи прямими каталізаторами утворення найтоксичнішого радикала - OH . Метали без змінної валентності (Cd, Pb, Ni) діють опосередковано - вони зв'язуються із сульфгідрильними (-SH) групами антиоксидантних ферментів, інактивуючи їх і викликаючи неконтрольоване накопичення АФК.

Важкі метали можуть посилювати деградацію важких метаболітів, таких як АТФ. Також, взаємодіючи з клітинними мембранами, вони змінюють їх проникливість та інші властивості. наприклад, Cd, Cu, Fe інколи викликають розрив клітинної мембрани. Морфолого-фізіологічними особливостями стійких видів є пізній початок вегетації, тривалий період

життєдіяльності листків та загальної вегетації. На газостійкість рослин впливають деякі особливості анатомічної будови листка. Стійкість рослин збільшують добре розвинений епідерміс, велика товщина кутикули, більш слабкий розвиток губчастої паренхіми порівняно з палисадною, менша вентиляція губчастої паренхіми, які понижують здатність листків до накопичення газів [100, 113, 125].

Стійкість рослини до одного металу, як правило, не поширюється на інші. Можна припустити, що дана властивість організму знаходиться під генетичним контролем і може бути використана при виведенні нових сортів рослин. Індивідуальність хімічного складу кожного виду рослин зв'язана з особливостями хімічного складу середовища, у якій формувалася даний вид. Ті елементи що переважно були представлені, в ґрунті ареалу виникнення виду і у тих сполученнях і концентраціях, у яких вони надходили в організм, закріплювалися в результаті еволюційного добору. Тому багато дослідників вважають, що хімічний склад рослин зберігає ознаки хімічного складу своїх попередників [76, 110, 135].

Отруєння рослин важкими металами може відбуватися не тільки за рахунок їхнього надходження в організм через корені з забруднених ґрунтів. Випадання металів з атмосфери на поверхню листків також може супроводжуватися негативною реакцією організму - зниженням фотосинтезу, посиленням дихання, гальмуванням відтоку метаболітів і тд.

В умовах Степового Придніпров'я маємо далеко неповну біологічно-екологічну характеристику квітково-декоративних рослин, значну частину яких становлять трав'янисті рослини. В озелененні важливе значення відіграє стійкість рослин проти забруднення повітря димом, пилом та газами. Дані властивості рослин враховуються під час озеленення Степового Придніпров'я [25, 48, 54].

Посилення розвитку промисловості та сільського господарства призвело до переорієнтації кола наукових інтересів дослідників в галузі екології. Відмічено явище пов'язане з посиленням антропогенного впливу на

рослинність різноманітного комплексу органічних та неорганічних поліютантів, кількість яких в довкіллі постійно збільшується.

Індустріальне Придніпров'я не є винятком. Ситуація, що тут склалася спонукає до проведення досліджень з питань вивчення механізмів адаптації та резистентності рослинних організмів до дії промислових поліютантів і, зокрема, важких металів. Реакція рослин на негативний стан довкілля проявляється у змінах процесів росту, розвитку та є інтегративним процесом, що залежить від здатності рослинних організмів пристосовуватись до цих умов існування [37, 53, 68].

Трав'янисті рослини більш стійкі ніж дерев'янисті, в умовах степової зони на фоні промислового забруднення.

Не дивлячись на ряд наукових праць, що стосуються стійкості рослин у різних екологічних умовах, питання використання квітково-декоративних рослин у відновлення рослинного покриву на територіях промислового міста висвітленні недостатньо.

Багато рослин промислових районів характеризуються меншою кількістю води в тканинах. Зниженням інтенсивності транспірації, яке спостерігається в умовах забрудненого середовища, призводить до змін температурного режиму та акумуляції токсикантів у рослинах.

Деякі рослини, які адаптувалися в умовах забрудненого ґрунту(збільшення відношення Mg/Ca, високий рівень Cr, Ni, Co), набули таких ознак: зменшення розмірів листків, затримка росту, перевага розвитку кореневої системи над надземною. Важкі метали впливають на фотосинтез рослин. Зниження концентрації хлорофілу в листках рослин може служити біоіндикаторною ознакою забруднення навколишнього середовища.

Для ряду культур Cd при концентрації його в тканинах 29 мк моль зумовлює зниження на 50% рівня фотосинтезу. Зниження фіксації CO₂ під впливом важких металів, зумовлюється таким причинами: сприяння важкими металами закриття продихів; зменшення кількості хлорофілу; дефіцит АТФ.

В присутності купрум, кадмій, плюмбум, знижується активність ферменту фотосинтезу - рибулозобісфосфаткарбоксилази, а під впливом купрум, кадмій, плюмбум, цинк - фосфоенолпіруваткарбоксилази. Крім цього встановлено інгібування активності карбоангідрази при взаємодії з високою концентрацією кадмію та його вплив на світлову фазу фотосинтезу.

В багаточисельних роботах, присвячених дії важких металів на рослини, розрізняють два типи механізмів стійкості: внутрішній та зовнішній. Внутрішні механізми характеризуються детоксикацією металів, які надійшли в рослину шляхом їх хелатування органічними кислотами, білками, появи стійких до металів ферментів. Зовнішні механізми не зв'язані життєдіяльністю організму. Вони виступають як наслідок властивості ґрунту, здатний зменшити надходження іонів металів із ґрунту в рослину [24, 36, 43, 59, 72].

Аналіз літературних даних свідчить про те, що для багатьох адаптованих видів рослин характерне чисельне накопичення важких металів в коренях. При високих їх концентраціях базальні частини коренів накопичують значно більші концентрації плюмбума, цинка і кадмія, ніж апікальні, особливо це характерне для стійких популяцій. Але в літературних даних є і протилежності, які свідчать про високе накопичення важких металів меристематичних клітинах [85, 92, 123, 125, 137].

Плюмбум, кадмій - відносяться до фітотоксикантів, цинк, купрум - до біомікроелементів, надходження в організм, яке у визначних дозах фізіологічно необхідне. Утримується в 1,2-2,3 рази більше марганцю і кадмію, в 1,2-1,6 рази купрум і цинк. Понад 10 елементів визнані пріоритетними забруднювачами біосфери. Серед них свинець, кадмій, купрум, ванадій, олово, цинк, нікель.

Головне джерело мікроелементів для рослин - це їх поживне середовище, тобто поживні розчини або ґрунти. Зв'язок мікроелементів з компонентами ґрунту - один із найбільш важливих факторів, який визначає її біологічну доступність. В цілому рослини легко поглинають форми

мікроелементів, розчинених у ґрунтових розчинах, як іонні, так і хелати і комплекси [35, 78, 116].

Хімічний склад рослин відображає в цілому елементний склад і залежить від багатьох різноманітних факторів. Звичайно концентрація мікроелементів у рослинах, які ростуть на різних, але не забруднених ґрунтах, виявляють дуже широкі варіації.

Поглинання мікроелементів корінням може бути пасивним (не метаболічним) і активним (метаболічним). Для ряду елементів у літературі, присвяченій визначенню способу поглинання, існують протиріччя. Не зважаючи на це, в будь-якому випадку швидкість поглинання мікроелементів буде позитивно корелюватися із доступним запасом, контактуючи з кореневою системою.

Важкі метали (за винятком ртуті), в основному заносяться в атмосферу аерозолями, значення яких у хімічному забрудненні повітря досить складне. У опадах, що випадають на поверхню ґрунту, можуть отримувати свинець, кадмій, нікель і цинк та інші елементи. Метали в кількості 10-30% від загального викиду в атмосферу поширюються на відстані 10 км і більше від промислового підприємства. При цьому спостерігається комбіноване забруднення рослин, що складається із осідання аерозолів та пилу на поверхню листя і засвоєння коренями важких металів, накопичених у ґрунті під час надходження забруднення із атмосфери. У зонах аеротехногенного забруднення у рослин з'являється хлороз, у рослинах накопичуються елементи: цинк кадмій ртуть. Якщо цинк необхідний для рослин і без нього в організмі порушується нормальний обмін речовин, гальмується ріст, зупиняється утворення насіння, то кадмій і ртуть - дуже токсичні і з'являються у рослинах випадково, в результаті забруднення ґрунту цими металами [157, 159, 173, 181]. Найбільші концентрації цинку спостерігаються у листі, у листових піхвах та міжвузлях у фазі інтенсивного росту і знижуються в наступному. Кореневі системи часто містять набагато більше

цинку, ніж надземні частини, особливо коли рослина виросла на ґрунті багатому на цинк.

Кількість важких металів, які діють несприятливо на живі організми, за антропогенної трансформації постійно зростає в навколишньому середовищі, вони входять у кругообіг органічних речовин, змінюючи їх геохімічні константи, посилюючи або ліквідуючи природні геохімічні аномалії і створюючи нові - техногенні.

Аналіз літературних джерел про зв'язок пошкодження і накопичення в листках рослин фітотоксикантів показує на видову (індивідуальну) чутливість рослинних організмів до речовин, які забруднюють повітря. Доведено, що існує зв'язок між надходженням токсичних речовин в листки, їхнім газообміном та транспірацією. Токсиканти, які надійшли в листки рослин частково перетворюються у клітинах і включаються в процеси метаболізму. Накопичення надмірної дози токсичних речовин у листі, пов'язане з обмеженим поглинанням їх клітинами, призводить до появи структурних і функціональних порушень в останніх [123, 129, 136, 147].

Якщо враховувати ці всі факти, стає зрозумілим, що накопичення токсичних речовин спостерігаються у місцях провідних судин. Зовнішнім проявом надмірного накопичення важких металів і спричинених ними порушень в листках є виникнення некротичних цяток на листовій пластинці або частково її відмирання.

В умовах промислового забруднення атмосфери у рослин зменшуються величина приросту, кількість листків на прирості, активність життєдіяльності листків, тривалість бутонізації і цвітіння, розміри листків, чашолистків. Редукція губчастої паренхіми, яка спостерігається в мезофілі нестійких видів, сприяє зниженню інтенсивності газообміну і підвищує здатність рослин до виживання [160, 161, 185].

РОЗДІЛ 2 ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБ'ЄКТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Фізико-географічна характеристика району дослідження

Дослідження проводили в межах міста Дніпро, яке є одним із найбільших індустріальних обласних центрів України з розвиненою транспортною інфраструктурою. Місто розташоване в центральній частині Дніпропетровської області в межах природної зони північного Степу (Степове Придніпров'я). Складність рельєфної будови території зумовлена розташуванням міста на межі Дніпровсько-Орільського та Сурсько-Дніпровського фізико-географічних районів, а саме Лівобережна частина представлена заплавно-рівнинним рельєфом, тоді як Правобережна частина представлена рівнинно-водороздільним сильно розчленованим рельєфом [111, 168, 170].

Головною водною артерією є річка Дніпро, яка в межах міста утворює велике водосховище. Попри потужний водний басейн, рослини міських насаджень не мають доступу до цих вод через відсікання підземного стоку бетонними колекторами, асфальтовим покриттям та гранітними набережними.

Ґрунтовий покрив міста представлений чорноземами звичайними, мало- та середньогумусними, що сформувались на лесах та лесоподібних суглинках. На заплавах річок поширені лучно-чорноземні та дернові піщані ґрунти. Проте в межах міської забудови природний ґрунтовий покрив зазнає глибокої урбаногенної трансформації, тому більшість міських клумб та газонів представлені урбаноземами та техноземами - штучно насипними ґрунтосумішами. Однією з головних ознак міських едафотопів є критичне переущільнення через антропогенне навантаження, а також низька вологоємність, залуження та дефіцит органічної речовини.

Клімат м. Дніпро є помірно континентальним з м'якою, малосніжною зимою та спекотним, сухим літом. Проте, аналіз метеорологічних даних за останнє п'ятиріччя (2021–2025 рр.) вказує на виражену трансформацію

кліматичних умов у бік аридизації (посилення посушливості). Середньорічна температура становить Протягом липня-серпня фіксуються тривалі періоди спеки, викликаючи термічний стрес у рослин. Літні місяці характеризуються тривалими бездошовими періодами. У літній період відносна вологість повітря падає нижче 20%, що призводить до виникнення суховіїв та високої випаровуваності та повітряної посухи [188, 189, 193].

Для міста Дніпро характерна висока сонячна інсоляція, яка в умовах розрідженого через хронічний промисловий смог озонового шару призводить до надлишкового УФ-опромінення рослин. Вітровий режим регіону відзначається переважанням східних та північно-східних вітрів у вегетаційний період. Влітку ці вітри часто набувають характеру суховіїв. Проходячи крізь міські транспортні коридори (урбанізовані каньйони), суховії стрімко інтенсифікують транспірацію рослин, провокуючи зневоднення клітин та змушуючи фітосистеми екстрено накопичувати вільний пролін для утримання клітинного тургору.

Середньорічна температура повітря становить $+9,0^{\circ}\text{C}$ - $+10,5^{\circ}\text{C}$ (що суттєво перевищує історичну норму минулого століття). Протягом липня-серпня фіксуються тривалі періоди («хвилі спеки»), коли денна температура сягає $+35^{\circ}\text{C}$ - $+39^{\circ}\text{C}$, викликаючи сильний термічний трес у рослин (Рис. 2.1).

Середня кількість опадів коливається в межах 450–520 мм на рік (Рис.2.2). Проте їхній розподіл є критично нерівномірним. Більша частина випадає у вигляді короткочасних злив, що призводить до швидкого поверхневого стоку без зволоження кореневмісного шару. Літні місяці супроводжуються тривалими бездошовими періодами (понад 30–40 діб поспіль).

Таким чином, сучасний кліматичний статус міста Дніпро характеризується як екстремально аридний з високим рівнем гідротермічного дистресу. Синергічне поєднання ефекту «міського теплового острова», тривалих бездошових періодів та суховіїв створює унікальний

мікрокліматичний пресинг на фітоценози [195, 197]. В умовах, коли атмосферна сухість змушує рослини посилювати висхідний транспіраційний потік для терморегуляції, коріння починає інтенсивно поглинати з урбаноземів розчинні форми важких металів. Це перетворює кліматичні особливості міста на каталізатор хімічного фітотоксикозу, що обґрунтовує необхідність дослідження біохімічних маркерів пошкоджень (МДА, деградація хлорофілів) та захисних систем (каротиноїди, пролін), представлених у наступних розділах роботи.

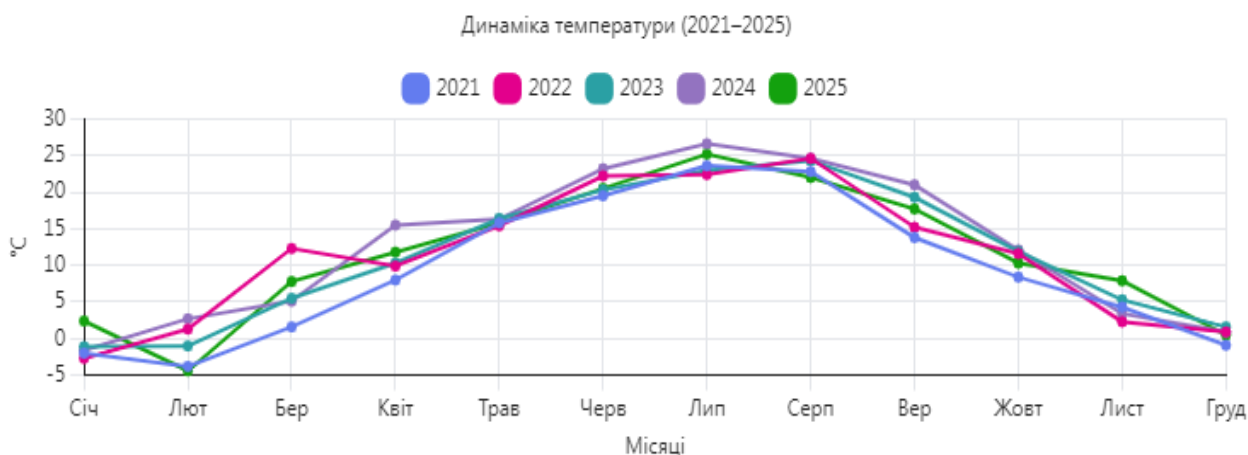


Рис. 2.1 Динаміка температурних змін м. Дніпро в період 2021-2025рр. [96]

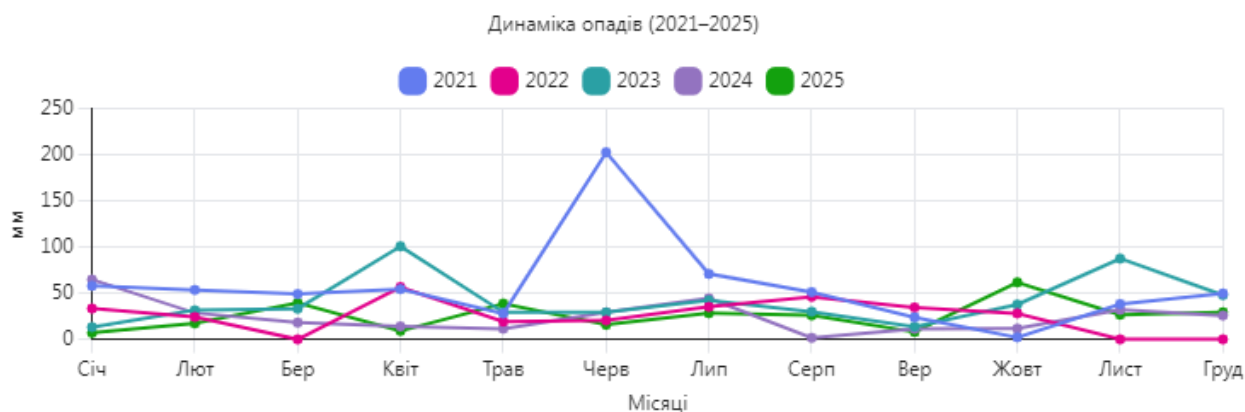


Рис. 2.2 Динаміка опадів м. Дніпро з 2021 до 2025 р. [96]

2.2 Об'єкти дослідження

Для вирішення поставлених завдань, оцінки інтегрованої відповіді на дію кліматичної аридизації та урбаногенного пресингу м. Дніпро, було обрано

11 модельних видів трав'янистих рослин, що належать до 3 ботанічних родин (*Asteraceae*, *Iridaceae*, *Poaceae*). Досліджувані види розділено на дві контрастні за походженням та біологічними стратегіями групи: квітково-декоративні інтродуценти (однорічні та багаторічні) та аборигенні газонні й рудеральні злаки [167, 178, 182].

Група 1. Квітково-декоративні інтродуценти

Ця група репрезентує класичний асортимент, який масово використовується для сезонного та регулярного озеленення міських клумб, рабаток та партерів м. Дніпро [191, 200].

- **Чорнобривці прямостоячі (*Tagetes erecta* L.)** - родина Айстрові (*Asteraceae*). Однорічна трав'яниста рослина, інтродукована з Центральної та Південної Америки. Характеризується потужною, розгалуженою кореневою системою та високою екологічною пластичністю. Вид вважається відносно стійким до високих температур за рахунок інтенсивного виділення ефірних олій, що знижують транспірацію.
- **Календула лікарська (*Calendula officinalis* L.)** - родина Айстрові (*Asteraceae*). Однорічник, що походить із Середземноморського регіону. Має стрижневу кореневу систему. Культура помірно ксерофітна, проте чутлива до тривалого перегріву верхніх шарів ґрунту, що часто спостерігається на приміагістральних клумбах.
- **Петунія гібридна (*Petunia* × *hybrida* Vilm.)** - родина Пасльонові (*Solanaceae*). Однорічна (в умовах України) трав'яниста рослина, складна садова гібридогенна форма південноамериканського походження. Класичний мезофіт із високою потребою в оптимізації водного режиму. Тканини листків ніжні, з високим індексом оводненості, що робить вид потенційно чутливим до повітряної посухи та хімічного смогу.

- **Мірабіліс ялапа (*Mirabilis jalapa* L.)** - родина Ночецвітові (*Nyctaginaceae*). Однорічна культура (походить з Мексики). Формує потужні підземні бульбоподібні потовщення коренів, які здатні акумулювати резервну вологу та поживні речовини. Це забезпечує виду автономну стійкість під час короткочасних періодів літньої посухи.
- **Ірис гібридний (*Iris* × *hybrida* hort.)** - родина Ірисові (*Iridaceae*). Багаторічна кореневищна рослина. Має специфічну екологічну стратегію: товсте горизонтальне кореневище виступає потужним депо для асимілятів та води. Вегетація та цвітіння відбуваються у весняно-ранньолітній період, що дозволяє виду завершити генеративну фазу до настання критичних серпневих «хвиль спеки».
- **Хризантема корейська (*Chrysanthemum* × *koreanum* hort.)** - родина Айстрові (*Asteraceae*). Багаторічна напівкущова рослина гібридного походження. Вегетаційний період тривалий, цвітіння -осіннє. Рослина приймає на себе весь кумулятивний ефект літнього гідротермічного стресу, що робить її зручним об'єктом для моніторингу хронічного оксидативного навантаження.
- **Айстра кущова (*Aster dumosum* L.)** - родина Айстрові (*Asteraceae*). Багаторічна трав'яниста рослина з міцним кореневищем, що походить з Північної Америки. Має щільні, дрібні листки з добре розвиненою кутикулою, що вказує на структурну адаптацію до умов сухого Степу.

Група 2. Аборигенні газонні та рудеральні злаки

Ця група включає види природної флори та традиційні газонні трави, які формують основу стійкого покриття (стійких міських луків) і часто ростуть безпосередньо на узбіччях доріг як дикорослі компоненти урбофітоценозів.

- **Пирій повзучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski)** - родина Злакові (*Poaceae*). Багаторічний довгокореневищний злак. Характеризується винятковою екологічною толерантністю, агресивним вегетативним розмноженням та потужним фітостабілізаційним потенціалом щодо важких металів.
- **Мишій зелений (*Setaria viridis* (L.) P.Beauv.)** - родина Злакові (*Poaceae*). Однорічний рудеральний злак. Наявність C-4-метаболізму (кооперація клітин мезофілу та обкладинки провідних пучків) забезпечує виду максимальну ефективність використання води, анатомічну стійкість до ультрафіолету та екстремальних температур міського «теплового острова».
- **Костриця лучна (*Festuca pratensis* L.)** - родина Злакові (*Poaceae*). Багаторічний нещільнокущовий. Має глибоку мичкувату кореневу систему. Використовується як базовий компонент міських газонів, чутливий до надмірного переущільнення урбаноземів та засолення (наслідок зимового використання протиожеледних реагентів).
- **Тонконіг лучний (*Poa pratensis* L.)** - родина Злакові (*Poaceae*). Багаторічний кореневищно-пухкокущовий злак. Формує щільну дернину, яка виступає природним фільтром для техногенного пилу. Помірно посухостійкий, здатний переходити у стан літнього спокою при тривалій відсутності поливу.

2.3 Характеристика дослідних ділянок

Для відбору рослинних зразків при проведенні дослідження було обрано 5 ділянок у м. Дніпро (Рис 2.3.1). Закладання дослідних та контрольної ділянки здійснювали з урахуванням екологічного градієнту: від територій із мінімальним антропогенним тиском до зон із хронічним транспортним та промисловим навантаженням [192, 200, 201].

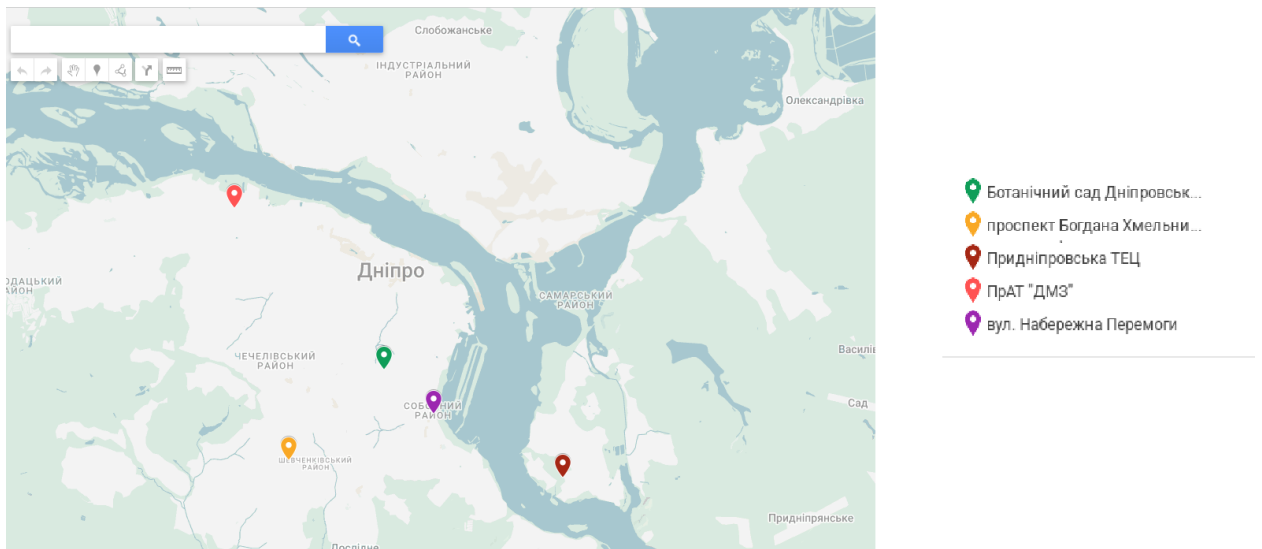


Рис. 2.3.1. Схематичне позначення точок відбору проб на карті м. Дніпра

Ділянка 1. Ботанічний сад ДНУ (умовний контроль)

Ділянка розташована в південно-західній частині міста, віддалена від великих промислових підприємств та захищена потужним масивом деревної рослинності від міського автотранспорту з мінімальним навантаженням. Ґрунтовий покрив представлений чорноземами звичайними малогумусними на лесах з оптимальною структурою, водним та повітряним режимом. Завдяки високій щільності насаджень ефект «міського теплового острова» тут нівелюється, гідротермічний режим є найбільш сприятливим. Територія Ботсаду ДНУ була обрана як умовний контроль для визначення базового фізіолого-біохімічного потенціалу рослин, норми функціонування антиоксидантної системи.

Ділянка 2. Проспект Богдана Хмельницького (транспортно-селітебна зона)

Ділянка характеризується комбінованим навантаженням з інтенсивним автотранспортним трафіком, вантажними перевезеннями, трамвайною лінією, близькістю до промислових майданчиків південної промислової зони. Магістраль характеризується високою щільністю забудови, рух транспорту є нерівномірним з частими заторами, що збільшує обсяг токсичних викидів. Ґрунти представлені техноземами - сильно переуцільненими із зміщеним рН

в бік залуження. Рослини зазнають постійної запиленості листкової пластинки та термічного стресу.

Ділянка 3 Зона впливу Придніпровської ТЕС

Придніпровська ТЕС як велике теплоенергетичне підприємство спричиняє промислове паливно-енергетичне навантаження. Основними забруднювачами повітря та ґрунту є великі обсяги сірчистого ангідриду SO₂, діоксиду азоту, а також специфічного золошлакового пилу, який містить мікрочастинки з високою концентрацією важких металів, які осідають на поверхні листків, блокуючи процеси транспірації та фотосинтезу. Викиди гарячих димових газів підсилюють регіональну кліматичну аридизацію.

Ділянка 4 Зона впливу ПрАТ «ДМЗ»

Зона із промисловим навантаженням, повітряний басейн насичений специфічними екотоксикантами: аміаком, діоксидом сірки, діоксидом азоту, чадним газом та дрібнодисперсним пилом. За даними моніторингу концентрації пилу тут регулярно перевищують ГДК, для ґрунту відмічено поліметалічне забруднення, рослини акумулюють високі концентрації, що провокує оксидативний стрес.

Ділянка 5 Вул. Набережна Перемоги

Характеризується автотранспортним навантаженням, одна із найважливіших магістралей міста з високою інтенсивністю руху. Спостерігається хронічне надходження вихлопних газів (оксиди азоту, оксиди вуглецю, вуглеводні) та абразивного пилу - продукти зносу шин. Відмічається підвищений вміст рухомих форм важких металів у ґрунті. Для цієї зони характерна висока інсоляція через відсутність затінення, асфальтове покриття акумулює тепло, посилюючи літню повітряну посуху.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1. Визначення активності СОД

Активність супероксиддисмутази (СОД, КФ 1.15.1.11) визначали за методом, що базується на оцінці інгібування відновлення нітросинього тетразолію в присутності нікотинамідаденіндинуклеотиду та феназинметасульфату. Реакційну суміш готували з фосфатного буфера (0,15 М, рН 7,8), феназинметасульфату, нітросинього тетразолію та НАДН. До підготовленої суміші вносили супернатант досліджуваних зразків.

Початок реакції ініціювали додаванням НАДН. Після інкубації реакційну суміш обробляли льодяною оцтовою кислотою для припинення реакції. Оптичну густину розчинів визначали спектрофотометрично при довжині хвилі 540 нм. Активність ферменту виражали в умовних одиницях на грам сирової маси за хвилину та розраховували за відповідною формулою:

$$T\% = \frac{\text{Контр.проба} - \text{Дослід.проба}}{\text{Контр.проба}} \cdot 100\%$$

$$A = \frac{2T}{(100 - T) \cdot H \cdot t}, \text{ де}$$

T% – відсоток гальмування реакції відновлення нітросинього тетразолію за 1 хв,

A – активність супероксиддисмутази в відносних одиницях на грам наважки за хвилину,

H – наважка рослинного матеріалу, г,

t – час інкубації, хв.

3.2 Визначення активності пероксидази

Виділення ферментного препарату. Для отримання ферментного препарату наважку рослинної тканини масою 0,1 г гомогенізували в порцеляновій ступці при температурі 4°C із 0,2 М ацетатним буфером (рН 5,4) або дистильованою водою у співвідношенні 1:10. За необхідності для

покращення руйнування тканин використовували скляний пісок. Отриманий гомогенат витримували протягом 30 хвилин, після чого центрифугували за 15000 g упродовж 20 хвилин при температурі 4°C. Після центрифугування супернатант відбирали у чисті сухі пробірки, які зберігали на льоду до моменту проведення аналізу. Отриманий екстракт використовували як джерело ферментів для подальших досліджень. За потреби супернатант зберігали в холодильнику не більше 2 годин.

Визначення активності бензидин-пероксидази

Активність бензидин-пероксидази визначали спектрофотометричним методом за швидкістю окиснення бензидину в присутності пероксиду водню. Для приготування реакційної суміші до 0,2 мл рослинного екстракту додавали 0,8 мл 0,2 М ацетатного буфера (рН 5,4) та 1 мл розчину бензидину. Ферментативну реакцію ініціювали внесенням 1 мл 1%-го розчину пероксиду водню в дослідну кювету. Одразу після цього реєстрували зміни оптичної густини при довжині хвилі 490 нм протягом 1 хвилини з інтервалом вимірювань 5 секунд відносно контрольної проби [5, 52].

У контрольному варіанті замість розчину пероксиду водню використовували 1 мл ацетатного буфера, що дозволяло врахувати фонові зміни оптичної густини.

Активність ферменту розраховували за відповідною формулою:

$A = \dots$, де:

A – активність ферменту (відносні одиниці оптичної густини на хвилину на 1 г наважки);

ΔD – приріст оптичної густини за час проведення реакції;

a – співвідношення об'єму рідини, використаної для приготування витяжки, до маси сирової тканини, $\text{см}^3/\text{г}$;

b – коефіцієнт додаткового розведення екстракту після центрифугування;

v – коефіцієнт розведення витяжки в реакційній суміші;

l – товщина оптичного шару кювети, см ;

H – маса рослинного матеріалу, г;

t – тривалість перебігу реакції, хв.

3.3. Визначення активності каталази

Принцип методу ґрунтується на визначенні кількості розкладеного пероксиду водню під дією ферментного препарату з використанням титрування перманганатом калію [52].

Виділення ферментного препарату. Наважку рослинної тканини масою 0,5 г гомогенізують при температурі 4°C у порцеляновій ступці з 0,2 М ацетатним буфером (рН 5,4) у співвідношенні 1:10. Отриманий гомогенат витримують 30 хвилин, після чого центрифугують протягом 20 хв при 15000 g і 4°C. Надсадову рідину (супернатант) переносять у чисті сухі пробірки та зберігають у ємності з льодом, використовуючи як ферментний препарат для подальших досліджень. За необхідності супернатант допускається зберігати в холодильнику не більше 2 годин.

Визначення активності каталази. У дві пробірки вносять по 1,5 мл ферментного препарату. Контрольну пробу попередньо кип'ятять протягом 2–3 хв для інактивації ферменту, після чого охолоджують. До обох пробірок додають по 4 мл дистильованої води та по 1 мл 1% розчину пероксиду водню. Інкубацію проводять протягом 20 хв при температурі 25°C. Реакцію зупиняють додаванням 1 мл 10% розчину сульфатної кислоти, після чого надлишок пероксиду водню титрують 0,1 н. розчином перманганату калію до появи слабо-рожевого забарвлення, яке зберігається не менше однієї хвилини.

Активність каталази визначають за різницею між показниками контрольного та дослідного титрування, розраховуючи кількість розкладеного пероксиду водню за час інкубації на 1 г вихідної рослинної сировини.

Розрахункові позначення:

- A — активність каталази (моль H_2O_2 на 1 г наважки за 1 хв);
- V — об'єм 0,001 М KMnO_4 , витрачений на холосте титрування (мл);
- b — об'єм KMnO_4 , витрачений на дослідне титрування (мл);
- C1/5 — молярна концентрація еквівалента KMnO_4 ;
- T — поправочний коефіцієнт титру розчину KMnO_4 ; E — молярна маса еквівалента H_2O_2 (17 г/моль);
- H — маса рослинного матеріалу (г); t — час інкубації (хв);
- Vзаг — загальний об'єм ферментного препарату;
- Vалікв — об'єм аліквоти ферментного препарату, взятого для аналізу (мл).

3.4 Визначення вмісту ТБК-активних речовин

В основу методу [52] покладено спектрофотометричне визначення концентрації забарвленого комплексу, що утворюється внаслідок взаємодії малонового діальдегіду (МДА) з двома молекулами тіобарбітурової кислоти (ТБК) в кислому середовищі при температурі 99–100°C.

Наважку рослинного матеріалу масою 0,5 г подрібнюють ножицями та ретельно гомогенізують у порцеляновій ступці з додаванням 3 мл дистильованої води. До отриманого гомогенату вносять ще 3 мл трихлороцтової кислоти (ТХО) та повторно проводять гомогенізацію для повного осадження білкових домішок.

Із підготовленого екстракту відбирають дві аліквоти по 2 мл у мірні пробірки з притертими пробками. До першої проби додають рівний об'єм (2 мл) ТХО, яка надалі використовується як контрольний зразок при спектрофотометричному вимірюванні. До другої проби вносять 2 мл розчину ТБК.

Після цього обидві проби інкубують протягом 30 хвилин на киплячій водяній бані, після чого швидко охолоджують і центрифугують протягом 10 хвилин при 3000 об/хв. Отриманий супернатант обережно відбирають і використовують для вимірювання оптичної щільності на спектрофотометрі (або фотоелектроколориметрі) при довжині хвилі $\lambda = 532$ нм.

Вміст малонового діальдегіду у рослинному матеріалі розраховують та виражають у наномолях МДА на 1 г сирової маси.

3.5 Визначення вмісту металів

Перед проведенням атомно-абсорбційного аналізу зразки піддавали попередній мінералізації методом «мокрого» озоління. Дана підготовка необхідна для переведення елементів у розчинну форму, придатну для подальшого визначення на атомно-абсорбційному спектрометрі.

Метод сирого озоління ґрунтується на окисненні органічної матриці під дією концентрованих мінеральних кислот — азотної, сірчаної, хлорної або їх сумішей. Процес проводять при відносно помірних температурах, однак навіть за таких умов існує ризик часткових втрат летких елементів, зокрема Sb, As, Zn, Pb, Se, P та інших.

Залежно від умов проведення, розрізняють два основні варіанти сирого озоління:

- а) у відкритій системі;
- б) у закритих (герметичних) системах під тиском [83, 89, 104].

У варіанті відкритої системи наважку зразка поміщають у герметичну тефлонову посудину, додають декілька мілілітрів концентрованої азотної кислоти або її суміші з хлорної кислотою. Далі пробу витримують при 70–105°C протягом 1–2 годин. Після завершення мінералізації та охолодження розчин додатково прогрівають у відкритій тефлоновій посудині при тій самій температурі для повного видалення надлишку кислот.

Порівняльні дослідження різних модифікацій «сухого» та «мокрого» озоління показали, що за умов подальшого атомно-абсорбційного визначення

концентрацій металів у рослинних тканинах обидва підходи забезпечують зіставні результати. У зв'язку з цим вибір методики визначався практичними критеріями, а саме:

- наявністю відповідного лабораторного обладнання, посуду та реактивів;
- мінімізацією етапів ручного перенесення проб;
- спрощенням процедури підготовки зразків;
- можливістю паралельної обробки великої кількості проб;
- використанням мінімальної кількості реактивів для зменшення ризику контамінації.

Враховуючи зазначені вимоги, була обрана оптимізована схема підготовки рослинних зразків методом сирого озоління.

Наважку рослинної тканини масою близько 2 г поміщають у тефлоновий стакан об'ємом 50 мл, зважують з точністю до 0,1 г та висушують при 105°C протягом 24–28 годин до досягнення сталої маси. Після охолодження в ексікаторі зразок повторно зважують з точністю до 0,01 г. Далі до проби додають 3–6 мл концентрованої (високочистої) азотної кислоти.

Мінералізацію проводять шляхом нагрівання відкритого тефлонового стакана при 70–80°C до зменшення об'єму та видалення надлишку кислоти. У випадку збереження темного забарвлення або помутніння розчину додають додатково 1 мл кислоти та повторюють прогрівання. Процес продовжують до отримання прозорого або слабкозабарвленого розчину з мінімальними залишками органічної речовини.

Для прискорення випаровування кислот можливе використання струменя CO₂, що генерується апаратом Кіппа. Отриманий залишок розчиняють у невеликому об'ємі деіонізованої води, після чого кількісно переносять у мірну посудину. Кінцевий об'єм доводять до 10 мл, використовуючи мірні пробірки з притертими пробками.

Для кожного типу рослинного матеріалу попередньо визначають мінімальний об'єм кислоти, необхідний для повного розкладу матриці, при

цьому не перевищуючи 10 мл концентрованої HNO_3 на 50 мл посудини. Тривале зберігання проб у кислому середовищі в тефлоновому стакані не допускається.

Паралельно з аналітичними зразками обов'язково виконують холостий дослід, який проходить усі стадії підготовки без додавання біологічного матеріалу.

У випадку аналізу малих наважок (менше 1 г) та необхідності значного розведення (≥ 10 мл) можливе зниження чутливості визначення мікроелементів (зокрема кадмію та кобальту) до межі детектування приладу. Для підвищення аналітичної чутливості застосовують попереднє екстракційне концентрування шляхом додавання органічних розчинників (метил-ізобутилкетону або н-амілового спирту) з подальшим інтенсивним перемішуванням у ділильній лійці та відокремленням водної фази після фазового розшарування.

Застосування органічних модифікаторів знижує в'язкість і поверхневий натяг розчину, що покращує умови атомізації в полум'ї та підвищує ефективність аспірації. У результаті попередньої обробки н-аміловим спиртом спостерігається підвищення чутливості визначення зазначених металів у 2–4 рази.

3.6. Визначення проліну

Визначення вмісту проліну ґрунтується на його реакції з нінгідрином, у результаті якої утворюється забарвлений комплекс червоного кольору, екстракція якого здійснюється в органічну фазу (толуол).

Для аналізу 1 г свіжого або глибоко замороженого рослинного матеріалу гомогенізують у порцеляновій ступці з 2–5 мл 3% розчину сульфосаліцилової кислоти. Отриману суспензію переносять у мірну пробірку об'ємом 15 мл і доводять загальний об'єм до 10 мл тим самим реагентом, забезпечуючи повне вилучення вільного проліну у фільтрат.

Після фільтрування відбирають 1 мл отриманого екстракту та переносять у центрифужну пробірку, додаючи 1 мл крижаної оцтової кислоти та 1 мл реакційного розчину нінгідрину. Суміш інкубують на киплячій водяній бані протягом 10 хвилин при 100°C для розвитку забарвлення.

Після завершення реакції проби швидко охолоджують на льоді для стабілізації утвореного комплексу. Для його екстракції додають 4 мл толуолу, після чого органічну фазу відокремлюють і використовують для спектрофотометричного вимірювання.

Оптичну щільність толуольного шару визначають при довжині хвилі 546 нм. Кількісний вміст проліну розраховують на основі попередньо побудованої калібрувальної кривої.

3.7. Кількісне визначення вмісту хлорофілу і каротиноїдів

Спектральні властивості фотосинтетичних пігментів характеризуються наявністю декількох максимумів поглинання, що відрізняються для окремих груп сполук. Зокрема, для хлорофілу а (Chl a) основні піки поглинання спостерігаються в діапазоні приблизно 410–430 нм та в червоній області спектра поблизу 660 нм. Для хлорофілу b (Chl b) характерними є максимуми близько 450 нм і 640 нм, причому їх точне положення може змінюватися залежно від типу розчинника. Каротиноїди, у свою чергу, демонструють інтенсивне поглинання в області 400–550 нм.

Кількісне визначення пігментів базується на використанні закону Ламберта–Бера, який описує зв'язок між інтенсивністю світла та концентрацією розчиненої речовини:

$$I/I_0 = \exp(-k \cdot c)$$

де: I = інтенсивність випромінювання, що падає на комірку детектора після проходження через кювету;

I_0 = інтенсивність випромінювання, що проходить через кювету;

k = питомий коефіцієнт згасання;

c = концентрація.

Для проведення аналізу 200 мг свіжого листкового матеріалу ретельно розтирали у ступці з 5 мл ацетону до отримання однорідної маси. Отриманий екстракт фільтрували та переносили у мірну пробірку, доводячи загальний об'єм до 10 мл.

Спектрофотометричні вимірювання проводили при довжинах хвиль 663, 646 і 470 нм (відповідно E663, E646, E470), що дозволяє роздільно оцінити внесок різних груп пігментів у загальне поглинання.

Розрахунок вмісту пігментів здійснювали за такими рівняннями:

$$\text{Chl } a \text{ [мкг}\cdot\text{мл}^{-1} \text{ екстракт]} = 12,21 \cdot E_{663} - 2,81 \cdot E_{646}$$

$$\text{Chl } b \text{ [мкг}\cdot\text{мл}^{-1} \text{ екстракт]} = 20,13 \cdot E_{646} - 5,03 \cdot E_{663}$$

$$\text{Каротиноїди [мкг мл}^{-1} \text{ екстракт]} = (1000 \cdot E_{470} - 3,27 \cdot E_{663} - 104 \cdot E_{646}) / 229$$

Додатково визначали сумарний вміст хлорофілу (Chl a + Chl b) у перерахунку на 1 г сирової маси, а також співвідношення Chl a/Chl b і відношення загального хлорофілу до каротиноїдів [99].

Всі вимірювання проводили в трьох повторностях і статистичний аналіз проводили за допомогою пакету програм Microsoft Excel та програми SPSS for Windows.

РОЗДІЛ 4 ФІЗІОЛОГО-БІОХІМІЧНІ МЕХАНІЗМИ ІНТЕГРОВАНОЇ ВІДПОВІДІ ГАЗОННИХ РОСЛИН НА СТРЕСОВІ ФАКТОРИ

4.1. Функціонування антиоксидантної системи як показник інтегрованого стресу

В процесі життєдіяльності рослини постійно підлягають різним видам біотичного абіотичного й антропогенного впливу та реагують на них генерацією активних форм кисню, що супроводжується розвитком в рослині ознак окисного стресу. У зв'язку з цим здатність рослин контролювати рівень активних форм кисню в значній мірі корелює з їх стійкістю до різних пошкоджуючих факторів. Відомо, що важлива роль в підтримці гомеостазу належить ферментативним системам і насамперед оксидоредуктазам, які в значній мірі визначають продуктивність насаджень та стійкість рослин до несприятливих чинників. Суттєвими компонентами цієї системи є наступні ферменти : супероксиддисмутаза, каталаза, пероксидаза [101].

Отримані дані свідчать що антропогенне забруднення урбоєкосистем приводить до збільшення вмісту пероксидних груп, активації антиоксидантних ферментів у вегетативних тканинах протягом всього онтогенезу у стійких та нестійких газонних рослин.

Результати свідчать про значне варіювання питомої активності каталази, виділеної із газонних трав, які підлягають впливу полікомпонентних викидів промислових підприємств [121, 126]. Встановлено також, що токсичні речовини металургійних підприємств, які містять головним чином важкі метали, викликають збільшення пероксидазної активності у 1,5-3 рази порівняно з контролем у всі строки вегетації. Хронічна дія ксенобіотиків хімічних підприємств активізували окиснювально - відновні процеси в 1,5-2 рази.

Підвищення активності пероксидази відмічено особливо в листках більш чутливих рослин. Індукція пероксидази може бути пов'язана з ефектами токсичної дії важких металів. З моменту потрапляння токсиканту у

цитоплазму відбувається їх накопичення у життєво важливих органоїдах клітин, в наслідок чого транслокація фітотоксикантів обмежується, і у процесі метаболізму виявляються серйозні відхилення.

Було встановлено, що активність каталази та СОД при надлишку важких металів в середовищі падає у видів різного ступеня стійкості, більше у нестійких [147, 190]. Інгібування активності каталази компенсується підвищенням активності пероксидази, що виявляється значно у толерантних видів. Це свідчить про порушення антиоксидантного статусу в клітинах рослин при накопиченні в них надлишкової кількості металів, що в свою чергу, може бути причиною підвищення вільнорадикальних процесів в клітинах.

У зонах підвищеного забруднення викидами коксохімічних та металургійних виробництв, а також вихлопними газами автотранспорту активність СОД в листі рослин у 1,5-3 рази нижче ніж у рослин жилих масивів, але активність СОД в листі рослин цих ділянок міської території вище ніж у рослин менш забрудненої міської зони. У досліджуваних груп не було виявлено відмінностей за компонентним складом пероксидази та СОД. В той же час питома активність пероксидази та СОД в листі рослин цієї групи була дуже гетерогенною, у окремих особин вона відрізнялась більше ніж у 2 рази [149, 186].

Максимальне значення активності пероксидази і каталази досягається в серпні-вересні. Значення активності цих ензимів на початку вегетації нижче ніж восени. У рослин, які вирощувались на майданчиках металургійних заводів максимальне значення активності відмічено у вересні. Антропогенний вплив промислових підприємств викликають збільшення каталазної активності на початку вегетації.

Досліджуючи дії сумішей фтористого водню, парів сірчаної кислоти, сірчастого ангідриду та аміаку на активність каталази у листі деревних та чагарникових рослин, що розрізняються за стійкістю до забруднення встановлено, що у видів зі зміненою стійкістю забруднення повітря веде до

підвищення активності каталази. У пошкодженому листі спостерігається зниження каталазної функції [26, 41].

Процес адаптації рослин до екстремальних факторів середовища в значній мірі пов'язані з трансформацією білок-синтезуючого апарату та новоутворенням білків, в тому числі й ферментативних. Механізми відповідної реакції рослин на вплив екологічних стресорів різноманітні. Вони торкаються різних ланків метаболізму, фізіолого-біохімічних процесів та генетичного апарату клітини.

В умовах хімічного забруднення у рослин зареєстровані зміни, як на рівні функціонального стану макромолекул, так і включення механізму індукованого синтезу білків, насамперед ферментів. Регуляція активності ферментів при стресах також пов'язана з механізмом алостеричної регуляції. Експресія стресових поліпептидів та ізоферментів (супероксиддисмутаза, пероксидаза, каталаза, поліфенооксидаза та ін) супроводжується репресією накопичення нормальних білків. Тригером стресової відповіді при хімічному забрудненні оточуючого середовища є зміна іонного балансу [53, 56, 64].

На даний час відомо, що участь молекул кисню в метаболізмі живих тканин йде двома шляхами. 1 - молекулярний кисень стоїть останнім акцептором електронів, взаємодіючи з цитохромоксидазною системою мітохондрій, в цьому випадку кисень перетворюється в воду та не зв'язується з проміжними метаболітами.

В несприятливих умовах середовища окисні процеси активізуються (в нормальних умовах протікають повільно за рахунок антиоксидантів), підвищується витрата антиоксидантів, зростає окиснення ліпідів, що призводить до порушення ліпід - білкових взаємодій мембран.

На ряду з окисно-відновним реакціями, які протікають в електрон-транспортному ланцюзі, в клітинах можливий інший шлях участі кисню в метаболічних реакціях - через безпосередню взаємодію з метаболітами з утворенням перекисів. Як правило, пероксидне окиснення протікає з утворенням вільних радикалів. При патології ПОЛ різко посилюється, чому

сприяє збільшення вмісту легко окислювальних поліненасичених ліпідів, зниження активності каталази, збільшення концентрації вільних радикалів [69, 74, 82].

Підвищена активність вільнорадикального оточення була встановлена як в рослинних так і в тваринних тканинах за різних видів екстремальних впливів. Проміжні продукти вільнорадикального окиснення - гідропероксиди - в малих концентраціях чинить фізіологічну дію викликаючи оборотну інактивацію ферментів та зміну проникності біомембран. Кінцеві продукти окиснення ліпідів, які мають вільні карбоксильні групи й одночасно пероксидні альдегідні кетонні та епоксидні групування, спричиняють токсичний вплив на клітину.

В біологічних об'єктах відомо велику кількість реакцій окиснення з утворенням супероксидного радикалу, який, взаємодіючи з пероксидом водню, дає гідроксильний радикал. Тому живі організми виробили захисні механізми за допомогою яких інактивуються вказані продукти окиснення або запобігають їх утворення. адаптація рослин до оточуючого середовища може здійснюватись завдяки зміні деяких властивостей клітинних ферментів. У видів адаптованих до холодних умов зростання зменшується термостабільність ферментів, які часто супроводжуються зменшенням величини енергії активації й зсувом оптимуму спорідненості ферменту до субстрату в бік більш низької температури. при адаптації до тепла зміна цих показників відбувається в протилежному напрямі.

Так фермент супероксиддисмутаза приймає участь в знешкодженні вільних радикалів з утворенням пероксиду водню. Каталаза приймає участь в розкладенні цього перекису водню, регулюючи змін фаз аеробних та анаеробних процесів й приймає участь в окисненні пероксидів в пероксисомах при фотодиханні . Пероксидаза - сама розповсюджена у рослин термінальна оксидаза. Вона збільшує свою активність за дії на рослини несприятливих факторів середовища [84, 86, 93].

Між каталоною та пероксидазою існує уявний антагонізм: пероксидаза активує пероксид водню, в той час як каталаза швидко та повністю розкладає його. Однак діючи одночасно обидва ензими не порушують свої специфічні функції, так як каталаза порушує ту частину перекису, яка не може бути використана пероксидазою для окисних процесів.

Компонентний склад ферментів визначається, перш за все, генетичними факторами але пошкоджуючий вплив полутантів на рослини, викликаючи певні фізіологічні реакції, можуть модифікувати ізоферментні спектри.

4.2. Інтенсивність процесів пероксидного окиснення ліпідів у вегетативних органах *Setaria viridis*, *Elytrigia repens* та *Poa angustifolia*, що зростають в умовах мегаполісу

ПОЛ перш за все ушкоджує клітинні мембрани, що у свою чергу приводить до порушень функцій мембранних білків і порушення внутріклітинної компартментації речовин. Продукти окислювальної модифікації ліпідів і малоновий діальдегід викликають мутації і блокують клітинне ділення [102, 106, 122].

Раніше ПОЛ вважали виключно спонтанним процесом, що протікає без участі ферментів. Потім було показано, що важливу роль в ПОЛ грають і ферментативні реакції, зокрема реакції ліпоксигенації, що каталізуються ліпоксигеназами. У нормі ліпоксигенази неактивні. Активація цього ферменту спостерігається при стресах пов'язаних з пошкодженням рослин при нападі комах або травоядних тварин. Окиснення ліпідів за допомогою цих ферментів приводить до утворення специфічних речовин - ейкозаноїдів, що виконують функцію сигнальних молекул при експресії генів.

Малоновий діальдегід (МДА) - виникає в організмі при деградації поліненасичених жирів активними формами кисню, служить маркером перекисного окиснення жирів (у тому числі і при дії випромінювання) і оксидативного стресу.

Рядом авторів вивчено вплив теплового шоку на ПОЛ в хлоропластах. Встановлено, що рівень ПОЛ як наслідок рівноваги про- і антиоксидантних систем змінювався у процесі росту і розвитку рослин. У фазі бутонізації різко зростала кількість гідропероксиду та знижувалась активність глутатіон-редуктази. Для періоду репродукції було характерним зниження активності антиоксидантних систем та підвищення рівня ПОЛ. В умовах теплового шоку (42°C протягом 2 годин) відбувалось збільшення дієнових кон'югатів, гідроперекисів та малонового діальдегіду у хлоропластах. При адаптації до стресу відбувалось підвищення активності СОД і вмісту каротиноїдів. ПОЛ та антиоксидантна система захисту в хлоропластах рослин є одним з факторів формування первинної відповідної реакції рослинної клітини на тепловий шок [137, 140, 141].

Малоновий діальдегід утворюється при деградації поліненасичених жирних кислот активними формами кисню та слугує маркером переокиснення жирів і оксидативного стресу.

Установлено, що досліджувані види газонних трав відрізнялись між собою за вмістом вторинних продуктів ліпопероксидації, як за контрольних умов існування, так і за впливу аерополютантів. Концентрація ТБК-активних продуктів у надземній частині мишію зеленого у віргінільному стані (*v*) перевищувала відповідний показник у пирію повзучого на 12 % в контрольному фітоценозі та 29-32 % в антропогенно забруднених фітоценозах. На наступних етапах розвитку (*g - ss*) ця тенденція перебільшення зберігалась: 46 – 79 % (Ботсад ДНУ) і 65-67 та 81-97 % (ПрАТ «ДМЗ»). (Рис. 4.2.1)

У коренях відмічено подібну закономірність. Рис. 4.2.2 Так, у віргінільному стані вміст вторинного продукту ПОЛ мишію перевищувало показник пирію на 21 (контроль) і 41-44 % (антропогенні території). У генеративну і субсенільну фаза онтогенезу фіксували збільшення ТБК-сполук у мишію на 45-50 % вище ніж у пирію з контрольного фітоценозу і на 63-67 і 58-64 % (антропогенно забруднених фітоценозів).

Від контрольного значення вміст малонового діальдегіду за всіх типів антропогенного забруднення у листках віргінільних особин *Elytrigia repens* зростав на 30 і 45 % на ділянках II та III, а у коренях – 20 і 35 % (рис. 4.2.1).

У генеративному віковому стані відміна між рослинами дослідних і контрольного фітоценозів складала 40 і 55 % (листки) та 31 і 44 % (корені).

На наступному субсенільному етапі розвитку ця тенденція перебільшення концентрації ТБК-активних продуктів на 42-50 % у надземних і 35-42 % у підземних органах зберігалась.

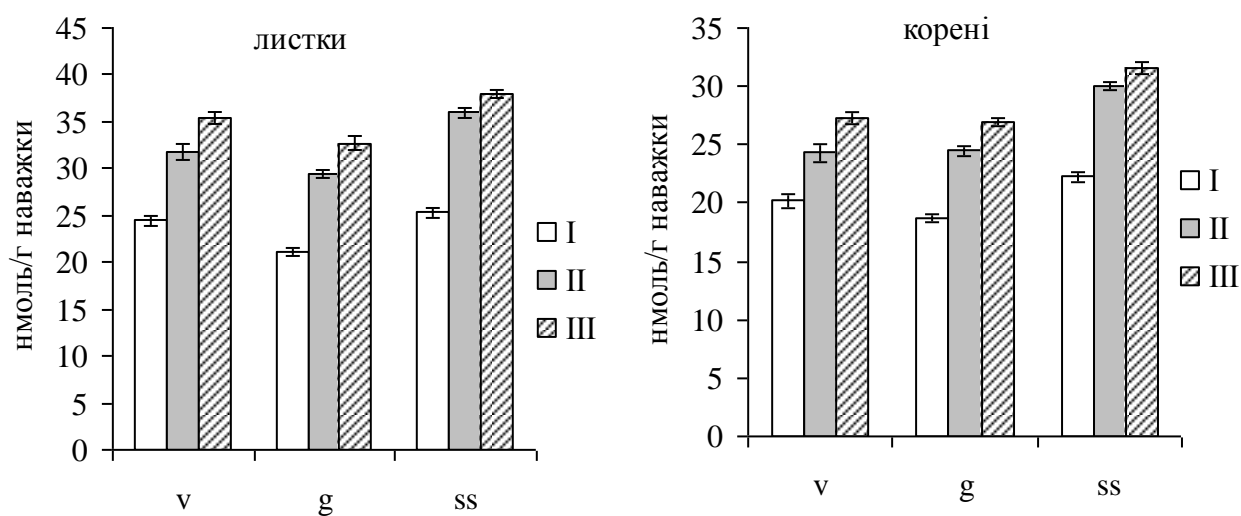


Рис. 4.2.1. Динаміка вмісту ТБК-активних продуктів у вегетативних органах *Elytrigia repens* (L.) Nevski: I – Ботсад ДНУ (контроль), II – просп. Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінільний, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани

У листках *Setaria viridis* фітоценозів, забруднених вихлопами автотранспорту і промисловими аерополітантами вміст ТБК-активних продуктів набагато перевищував контрольний рівень: віргінільний стан на 50 і 71 % відповідно. У коренях на цьому етапі онтогенезу вміст досліджуваних сполук був збільшеним на 40 і 60 %.

Генеративна стадія розвитку мишію зеленого відзначена подальшим накопиченням вторинного продукту ПОЛ у листках на 60-75 %, коренях – 51-62 %.

Максимальні значення притаманні рослинам у субсенільному стані. При цьому рівень ТБК-продуктів збільшений на 54-65 у надземних і 43-55 % підземних органах (рис. 4.2.2).

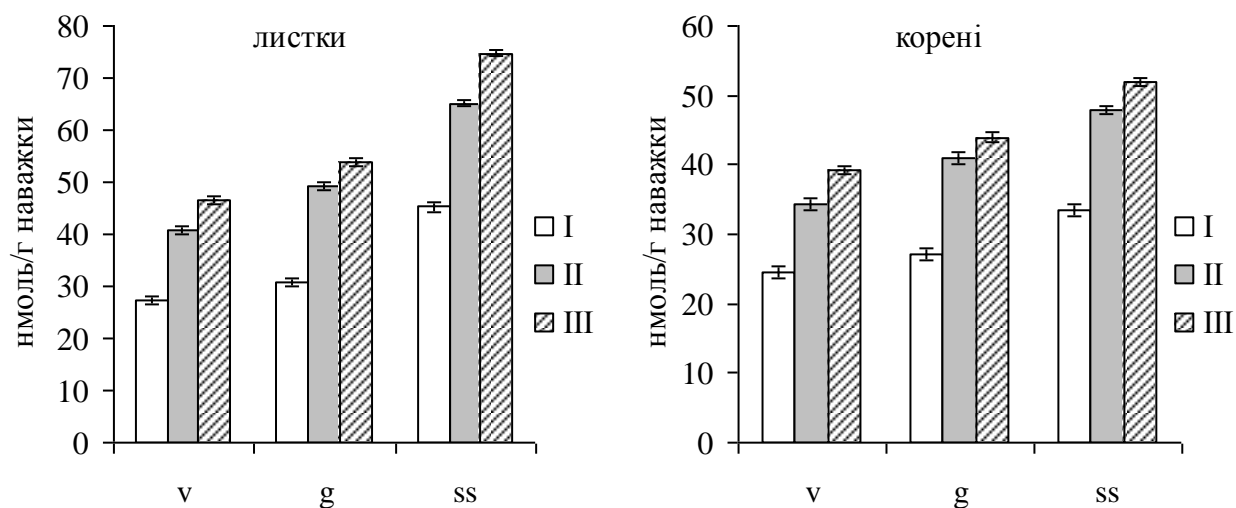


Рис. 4.2.2. Динаміка вмісту ТБК-активних продуктів у вегетативних органах *Setaria viridis* (L.) Beauv.: I – Ботсад ДНУ (контроль), II – просп. Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінільний, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани

Результати досліджень накопичення ТБК-сполук у вегетативних органах *Poa angustifolia* L. свідчать про зростання інтенсивності процесів ПОЛ і для даного виду на всіх моніторингових майданчиках (рис. 4.2.3). Кількість вторинних продуктів окиснення у листках і коренях вегетативних особин підвищувалась на 42-58 і 33-45 % в порівнянні з контролем.

Накопичення продукту ПОЛ реєстрували при переході рослин тонконогу вузьколистого до генеративного періоду розвитку: на 54-65 % (листки) і 43-52 % (корені).

Динаміка інтенсивності процесів ліпопероксидації при переході до субсенільного етапу онтогенезу спрямована на подальше збільшення. Даний

показник виявився вищим за контроль на 61-74 у листках і 52-62 % у коренях.

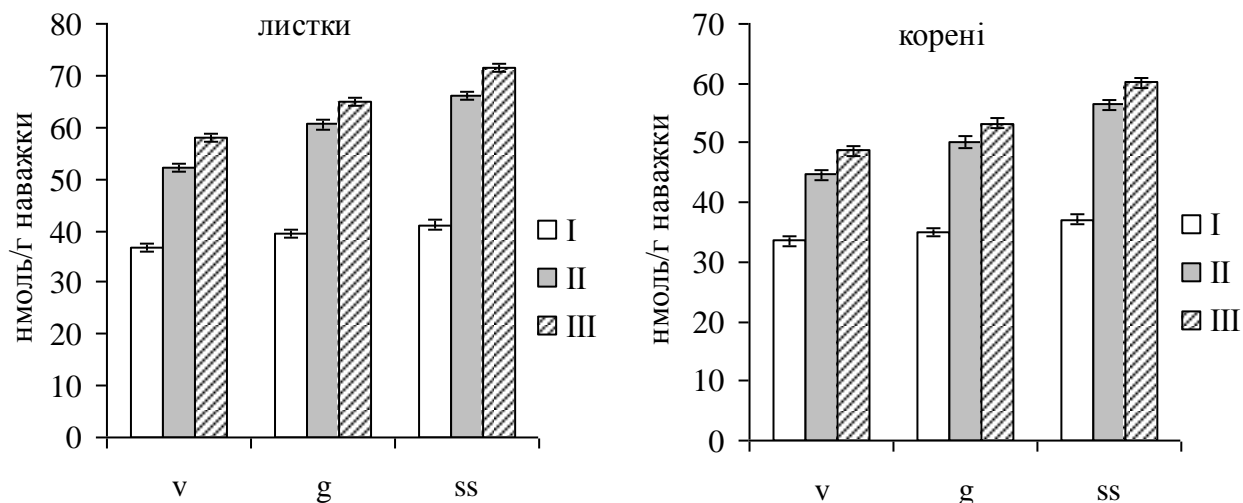


Рис. 4.2.3. Динаміка вмісту ТБК-активних продуктів у вегетативних органах *Poa angustifolia* L.: I – Ботсад ДНУ (контроль), II – просп. Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінільний, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани

Згідно отриманих даних, хронічне антропогенне забруднення міського фітоценозу промисловими й автомобільними аерополітантами індукувало окиснювальний стрес у дослідних рослин *Setaria viridis*, *Elytrigia repens* та *Poa angustifolia*, що впродовж онтогенезу проявлялось у збільшенні вторинних продуктів ліпопероксидації. Процеси ПОЛ інтенсивніше протікали у особин мишію зеленого та тонконогу звичайного, ніж у пирію повзучого, що ймовірно свідчить про чутливість видів до стресу.

4.3. Сезонна динаміка активності супероксиддисмутази у листках і коренях дерноутворюючих трав за хронічного техногенного стресу

Зелені рослини є загальноновизнаними біофільтрами, здатними поглинати та акумулювати токсичні сполуки з навколишнього середовища.

У зв'язку з цим однією з актуальних задач є дослідження реакції рослинних організмів на різних стадіях онтогенезу на аеротехногенне забруднення середовища з метою виявлення найбільш стійких до поллютантів видів. Полікомпонентні забруднювачі, які надходять до рослинного організму, викликають окиснювальний стрес і призводять до посилення процесів ПОЛ та перебудови метаболізму.

Для попередження порушень метаболізму за стресових умов рослини виробили систему антиоксидантного захисту, яка включає велику кількість механізмів. Особливе місце в ній займають ферменти-антиоксиданти, а саме супероксиддисмутаза (СОД), каталаза та пероксидаза.

Ферментативні антиоксиданти, на відміну від низькомолекулярних сполук, характеризуються високою специфічністю, тобто їх дія спрямована проти визначених форм кисню. Роль антиоксидантних ферментів в процесах формування захисних реакцій вегетативних органів дерноутворюючих рослин в умовах дії полікомпонентного забруднення промислових міст вивчено недостатньо. У зв'язку з цим було проведено порівняльний аналіз рівня активності антиоксидантних ферментів у листках і коренях пирію повзучого, мишею зеленого та тонконогу гребінчастого в процесі онтогенезу за дії аеротехногенного забруднення. Одночасне дослідження декількох показників системи антиоксидантного захисту рослин в умовах стресу дозволить виявити різноманітність зворотніх захисних реакцій рослинного організму та створити базу для розробки моделей, які дозволять описати процеси функціонування всієї системи в цілому в умовах стресу.

Детоксикація активних форм кисню відбувається за участю високомолекулярних ферментів-антиоксидантів, серед яких важливу роль відіграє супероксиддисмутаза. Вважають, що активність СОД є показником неспецифічної резистентності до стрес-факторів і змінюється в залежності від тривалості дії та напруженості стрес-чинників.

Експериментально встановлено, що активність супероксиддисмутази у надземній масі віргінільних рослин пирію з контрольної ділянки перевищувала значення ферменту мишію на 65 %, а з території просп. Б. Хмельницького і «ДМЗ» – 43 і 41 %. У генеративному віковому стані злакових різниця між активністю складала 74 і 47 - 48 % відповідно. Рівень активності СОД *Elytrigia repens* (субсенільна фаза) з контрольної ділянки перевищував такий у *Setaria viridis* на 62 %, а дослідної – на 34-21 %.

Аналогічні зміни відзначені для підземної маси (корені). Активність ферменту у коренях пирію повзучого перевищувала значення СОД мишію зеленого в контролі на 47 (v), 70 (g), 70 % (ss). В умовах впливу викидів автотранспорту активність ферменту збільшена відповідно на 10, 44, 42 %, а за дії промислових аерополютантів – на 22, 38, 29 %.

Як видно з рисунка 4.3.1 у листках і коренях пирію звичайного (вергінільна фаза) активність супероксиддисмутази за впливу викидів автотранспорту перевищувала контрольний рівень відповідно на 30 і 20 %. На фоні промислового забруднення цей показник виявився вираженішим і перевищував контроль на 45 і 33 %.

Генеративний стан *Elytrigia repens* відзначився наростанням активності СОД порівняно з попереднім етапом онтогенезу. У рослин, що зростають на узбіччі просп. Б. Хмельницького відмічена суттєва активація ферменту на 43 (листки) і 32 % (корені).

Подібну тенденцію зафіксовано і для особин, зібраних поблизу «ДМЗ»: листки на 52, корені – 44 % вище контролю.

Перехід рослин пирію повзучого до субсенільного стану пов'язаний із деяким зниженням активності СОД порівняно з періодом g. Однак слід відмітити, що відносно контрольних зразків перевищення складало 40-51 % (листки) і 35-45 % (корені).

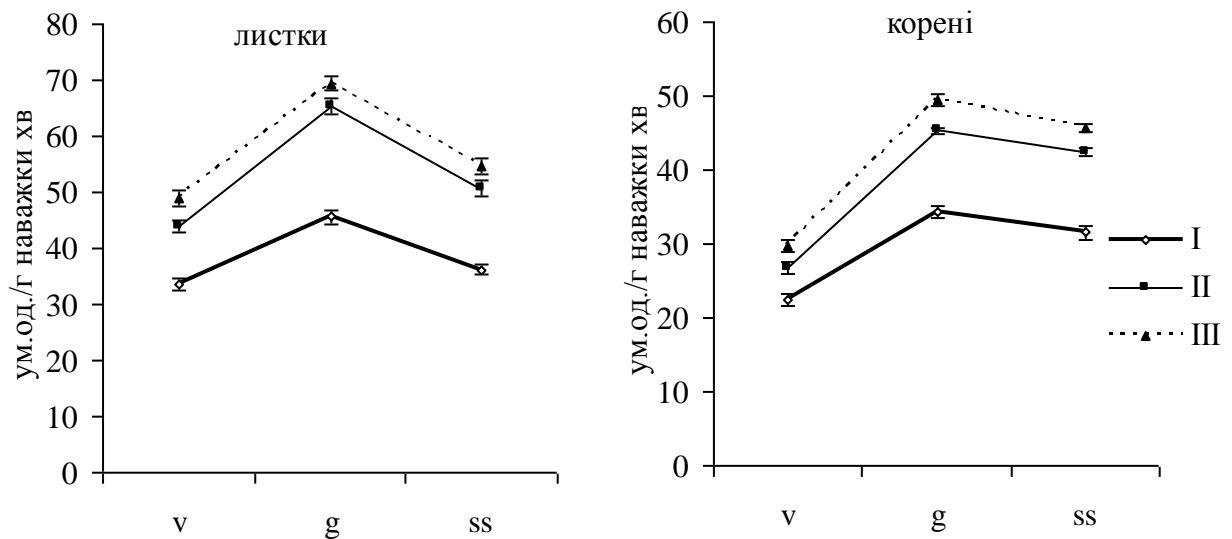


Рис. 4.3.1 Сезонна динаміка активності супероксиддисмутази у вегетативних органах *Elytrigia repens* (L.) Nevski: I – Ботсад ДНУ (контроль), II – просп. Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінільний, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани

Максимальні показники активності зафіксовано у генеративних рослин. Рівень активності СОД в листках перевищував контрольний у цей час на 68 (за впливу вихлопів автотранспорту) і 80 % (промислові викиди). В коренях відповідно на 52 і 73 %.

В період досягнення рослин субсенільного стану спостерігали зниження активності СОД порівняно з попереднім етапом онтогенезу. При цьому рівень ферментативної активності перевищував контрольний на 70 і 60 % за хронічної дії поллютантів з просп. Б. Хмельницького і на 102-91 % за впливу промислового навантаження.

Для рослин мишію зеленого, що зростають у антропогенного забруднених фітоценозах реєстрували аналогічну тенденцію у зміні активності СОД (Рис. 4.3.2). Так, на початку онтогенезу (v-стадія) значення активності ферменту вегетативних органів були збільшені на 50-40 % (просп. Б. Хмельницького) і 70-60 % («ДМЗ»).

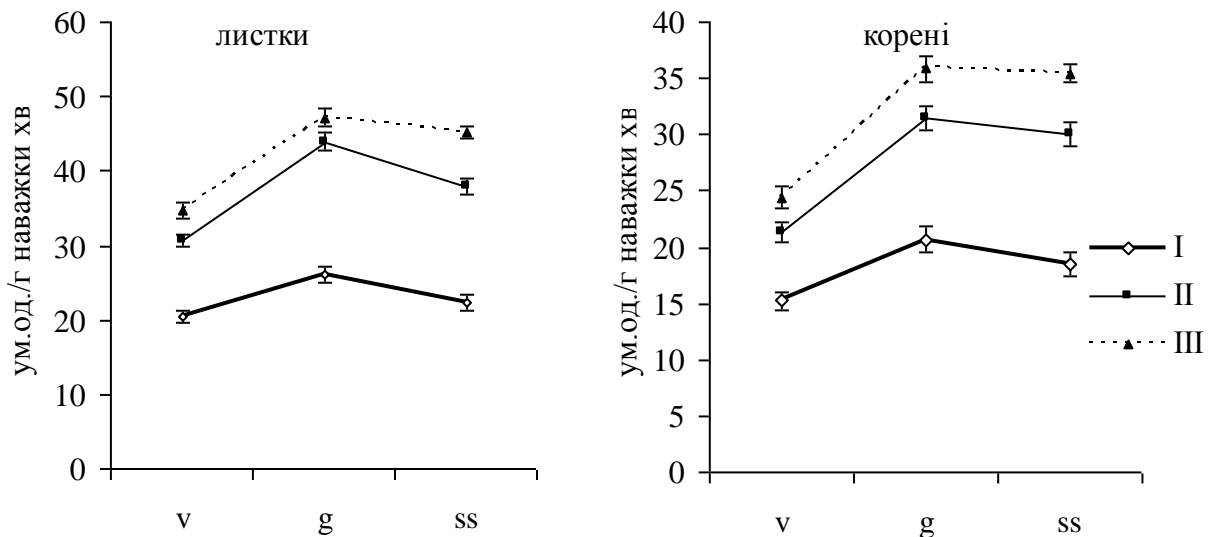


Рис. 4.3.2 Сезонна динаміка активності супероксиддисмутази у вегетативних органах *Setaria viridis* (L.) Beauv.: I – Ботсад ДНУ (контроль), II – просп. Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінійський, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани

Отримані результати вказують, що активність супероксиддисмутази у листках і коренях тонконогу вузьколистого, що зростає на узбіччі просп. Б. Хмельницького на початку онтогенезу (фаза вегетативна) збільшена на 44 і 35 % порівняно з контрольними рослинами (рис. 4.3.3). У рослинах *Poa angustifolia* L. з території «ДМЗ» в цей період активність ферменту перевищувала контроль на 61 і 56 %.

Перехід рослин до генеративної фази характеризувався підвищенням активності ензиму асиміляційних органів на 55-72 %, коренів на 46-63 %.

Динаміка зміни активності СОД при переході від генеративної до субсенільної стадії мала тенденцію до деякого зниження порівняно з попередньою фазою. Відносно контрольних рослин цей показник збільшено на 60 і 55 % у листках і коренях тонконогу, що зростає за хронічної дії викидів автотранспорту. В умовах промислового навантаження активність супероксиддисмутази збільшена на 79 (листки) і 66 % (корені).

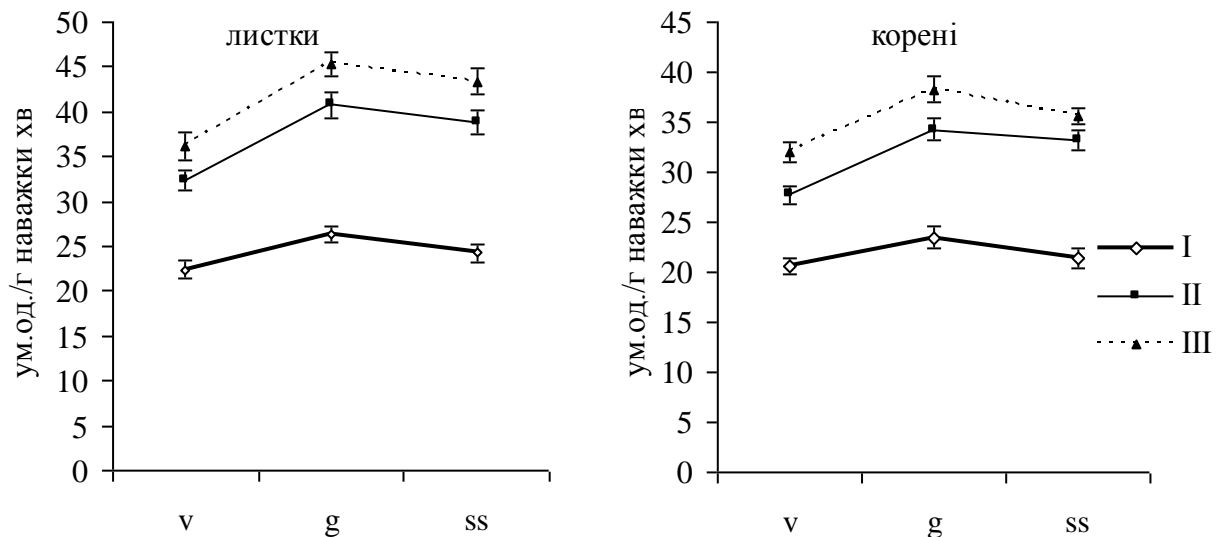


Рис. 4.3.3 Сезонна динаміка активності супероксиддисмутази у вегетативних органах *Poa angustifolia* L.: I – Ботсад ДНУ (контроль), II – просп. Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінільний, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани

При цьому зареєстроване нами деяке зниження активності ферменту рослин в субсенільний період порівняно з попередніми етапами онтогенезу пов'язано із зниженням здатності рослинної тканини знешкоджувати АФК з віком.

4.4. Хронічний вплив аерополітантів примігстральних і промислових територій на активність каталази вегетативних органів пирію повзучого, мишію зеленого і костриці валійської

Підвищення активності СОД за дії аеротехногенного забруднення призводить до накопичення в рослинному організмі пероксиду водню, який є токсичною сполукою і негативно впливає на метаболічні процеси. Основними ферментами, які знешкоджують H_2O_2 в клітинах, є каталаза і пероксидаза. Ці ензими працюють у другій лінії захисту від окиснювального стресу. На відміну від пероксидаз, цей фермент не потребує відновленого субстрату для активності. Зниження активності каталази призводить до утворення реакційно агресивного ініціатора ПОЛ - гідроксильного

радикалу – і може бути діагностичною ознакою чутливості рослин до антропогенних навантажень.

Проведені дослідження по даному ферменту в листках і коренях *Elytrigia repens* дали змогу встановити високий рівень його активності у всіх досліджуваних варіантах. Як видно із даних рис. 4.4.1, активність каталази у вегетативних органах пірїю повзучого з промислової території на початку онтогенезу підвищені на 25 і 20 % відносно контрольних рослин. У рослин, зібраних з узбіччя просп. Б. Хмельницького активність каталази збільшена лише на 16 (листки) і 10 % (корені).

Для рослин *Elytrigia repens* в період переходу до генеративної фази розвитку активність ферменту зростала порівняно з попереднім етапом в листках-коренях з контрольної ділянки на 36-31%, у вегетативних органах рослин з ділянки II і III – на 46-44 і 49-48 %.

При порівнянні контролю і досліду зафіксовано інтенсифікація каталазної активності на 25 і 20 % у листках і коренях особин, які зростають на просп. Б. Хмельницького й 37 і 33 % – у вегетативних органах рослин з «ДМЗ».

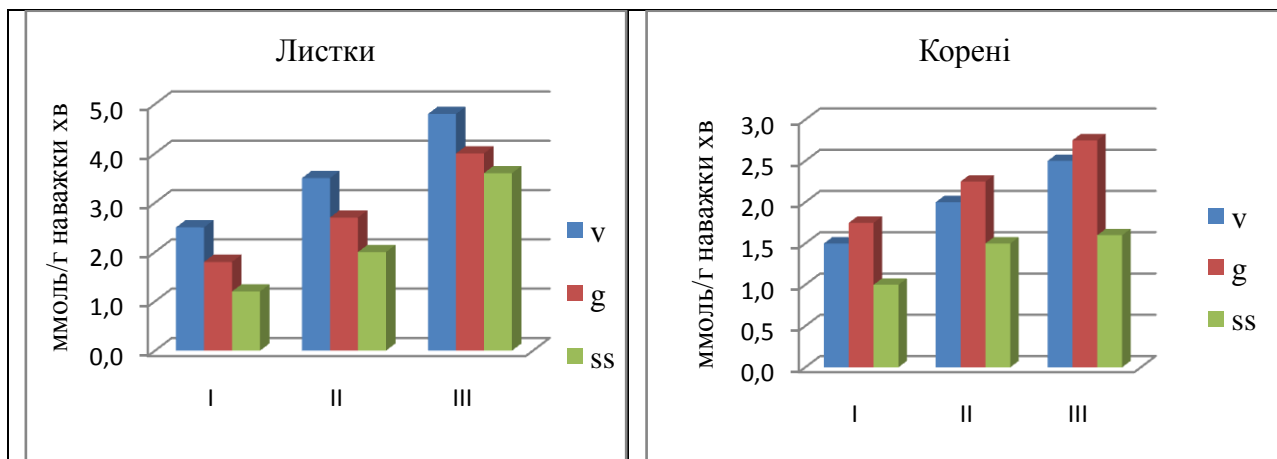


Рис. 4.4.1. Вплив аерополітантив на активність каталази у вегетативних органах *Elytrigia repens* (L.) Nevski: I – Ботсад ДНУ (контроль), II – просп. Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінільний, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани

Вступ рослин пірію повзучого у субсенільну фазу відзначено незначним зниженням активності ензиму відносно попередньої фази розвитку в середньому на 5–12 %. Але активність каталази у вегетативних органах *Elytrigia repens* з моніторингових ділянок достовірно збільшена порівняно з контрольними рослинами на 35-25 % (просп. Б. Хмельницького) та 49-39 % («ДМЗ»).

У листках і коренях *Setaria viridis* віргінільного періоду в забрудненому промисловими викидами та вихлопами автотранспорту фітоценозі активність каталази збільшена відносно рослин контрольного фітоценозу на 23-42 і 20-33 % (рис. 4.4.2)

Надалі (генеративний стан) активність ферменту зростала відносно попередньої фази у контролі на 33 %, а у досліді – 51-55 %. Для рослин мишію зеленого, які зростають на ділянці II (вихлопи автотранспорту) активація ферменту становила 40 і 31 % вище контролю. Особини, зібрані на ділянці III (промислове забруднення) відзначились вищими значеннями активності: 60-55 %.

У субсенільний період онтогенезу тенденція до перебільшення контрольного рівня зберігалась на 50-70 % в надземній масі *Setaria viridis* і 42-68 % в підземних органах в усіх дослідних фітоценозах.

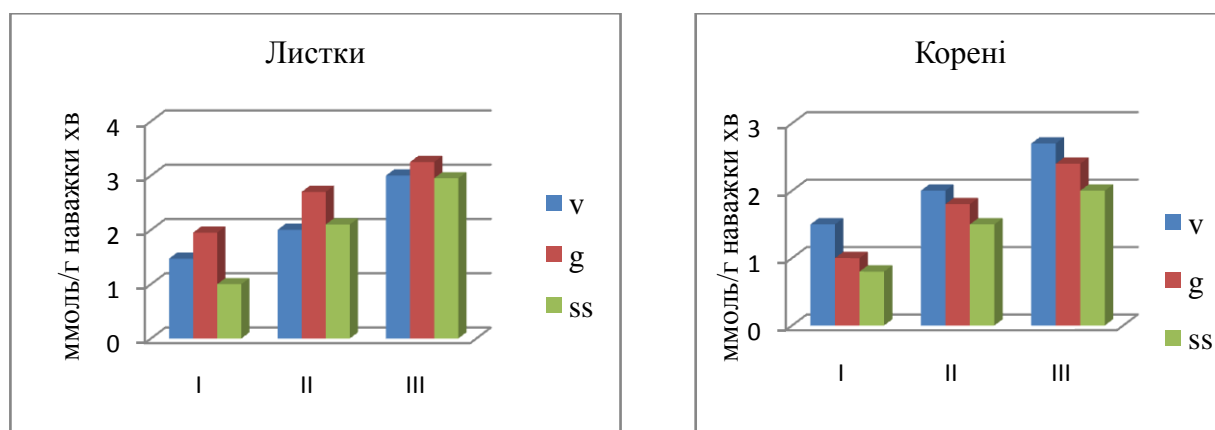


Рис. 4.4.2 Вплив аерополітантів на активність каталази у вегетативних органах *Setaria viridis* (L.) Beauv.: I – Ботсад ДНУ (контроль), II – просп. Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінільний, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани

Результати досліджень сезонної динаміки активності каталази у вегетативних органах *Festuca valesiaca* L. свідчать про зростання даного показника і для даного виду на всіх моніторингових майданчиках (рис. 4.4.3). Рівень активності каталази у листках і коренях вегетативних особин перевищує контроль на 25 і 20 % за дії викидів автотранспорту. За дії промислових аерополітантів «ДМЗ» активність ферменту збільшена на 40 і 35 % в порівнянні з контролем.

У генеративних рослин костриці валійської зафіксовано максимальну активність каталази. В листках і коренях, відібраних на узбіччі просп. Б. Хмельницького рівень каталази перевищує контрольний на 45 і 34 % відповідно. Вегетативні органи *Festuca valesiaca* L., які зростають на території «ДМЗ», характеризуються збільшеною активністю ферменту на 63 і 58 %.

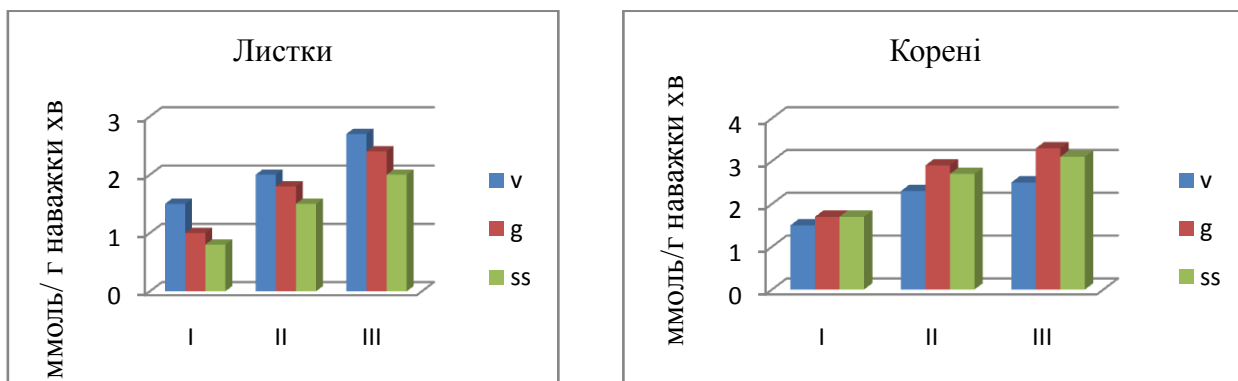


Рис. 4.4.3. Вплив аерополітантів на активність каталази у вегетативних органах *Festuca valesiaca* L.: I – Ботсад ДНУ (контроль), II – просп. Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінійський, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани

Динаміка інтенсивності функціонування каталази при переході до субсенільного етапу онтогенезу спрямована на подальше збільшення. Даний показник виявився вищим за контроль на 56-73 у лисках і 44-63 % у коренях.

Більшість рослинних організмів володіє пониженою активністю каталази на забруднених ділянках зростання, і чим вище стійкість виду до забруднюючих речовин, тим більш висока стабільність дії цього ферменту, і, навпаки, більший ступінь інгібування його активності може

являться діагностичною ознакою слабкої стійкості рослин до антропогенних навантажень.

Відзначене в нашому дослідженні збільшення активності каталази в листках і коренях дерноутворюючих трав на всіх етапах онтогенезу, пов'язано із стійкістю даних видів до хронічного впливу автотранспортних і промислових викидів на окисно-відновні процеси. Оскільки відомо, що стійкі рослинні організми мають більш високі рівні й активності ферментів-антиоксидантів, тобто ефективнішу систему захисту, то рослини *Setaria viridis* (L.) Beauv., *Elytrigia repens* (L.) Nevski та *Festuca valesiaca* L. проявляють стійкість до умов свого існування.

Таким чином, одним з механізмів адаптації досліджуваних рослин до хронічної дії антропогенних факторів міського середовища м. Дніпро є інтенсифікація функціонування каталазної активності, спрямованої на ефективне знешкодження пероксиду водню, що утворюється в реакції, яку каталізує СОД.

4.5. Зміни пероксидазної активності у вегетативних органах дерноутворюючих трав, що зростають у фітоценозах промислових і автомагістральних територій

На даний час в біологічних об'єктах відомо велику кількість реакцій окиснення з утворенням супероксидного радикалу O_2^- , який взаємодіючи з пероксидом водню, дає гідроксильний радикал ОН. Тому живі організми виробили захисні механізми, за допомогою яких інактивують H_2O_2 ; O_2^- ; ОН або призупиняють їх утворення.

Найбільшу увагу в фізіолого-екологічних дослідженнях привертає пероксидаза. Пероксидаза, приймаючи участь в розкладенні пероксиду водню в рослинних тканинах, сприяє інактивації процесів вільнорадикального окиснення в клітині при екзогенних впливах. Зміна активності пероксидази відмічається за різних видів стресів. У рослин встановлено підвищення активності ензиму за хімічного забруднення

оточуючого середовища ксенобіотиками, промисловими фітотоксикантами, іонами важких металів, викидами автотранспорту.

Враховуючи важливість пероксидази в механізмі адаптації рослин до різних видів стресу, ми вивчали активність пероксидази в онтогенезі дерноутворюючих трав рослини *Setaria viridis*, *Elytrigia repens* та *Festuca valesiaca*, що зростають в фітоценозах міста Дніпро.

Як видно з рис. 4.5.1, активність пероксидази листків і коренів контрольних рослин пирію повзучого у віргінільну фазу онтогенезу складала 24,42 і 20,24 ум.од./г наважки хв. У рослин зібраних на території просп. Б.Хмельницького цей показник становив 31,75 і 24,29 ум.од./г наважки хв. (на 30 і 20 % вище за контроль). Для особин *Elytrigia repens* з ділянки «ДМЗ» відзначено найвищі значення активності ферменту 35,4 і 27,32 ум.од./г наважки хв. (на 45 і 35 % вище контрольних значень).

При переході від віргінільного стану до генеративного динаміка активності пероксидази у вегетативних органах пирію повзучого з різних досліджуваних районах була спрямована в бік інтенсифікації. Так, в листках і коренях з контрольної ділянки стимуляція активності ензиму становила 7-15 %, а з антропогенних фітоценозів на 16-25 і 15-22 %. При порівнянні контролю і досліду зафіксовано стимуляцію пероксидазної активності на 40 і 55 % у листках пирію повзучого, який зростає на ділянках II (вихлопи автотранспорту) і III (промислові викиди), у коренях – на 31 і 44 % відповідно.

Субсенільний етап онтогенезу відзначається подальшим збільшення активності ензиму відносно попередньої фази розвитку. При цьому активність пероксидази у вегетативних органах *Elytrigia repens* з моніторингових ділянок достовірно збільшена порівняно з контрольними рослинами на 42 і 35 % (просп. Б. Хмельницького) та 50 і 42 % («ДМЗ»).

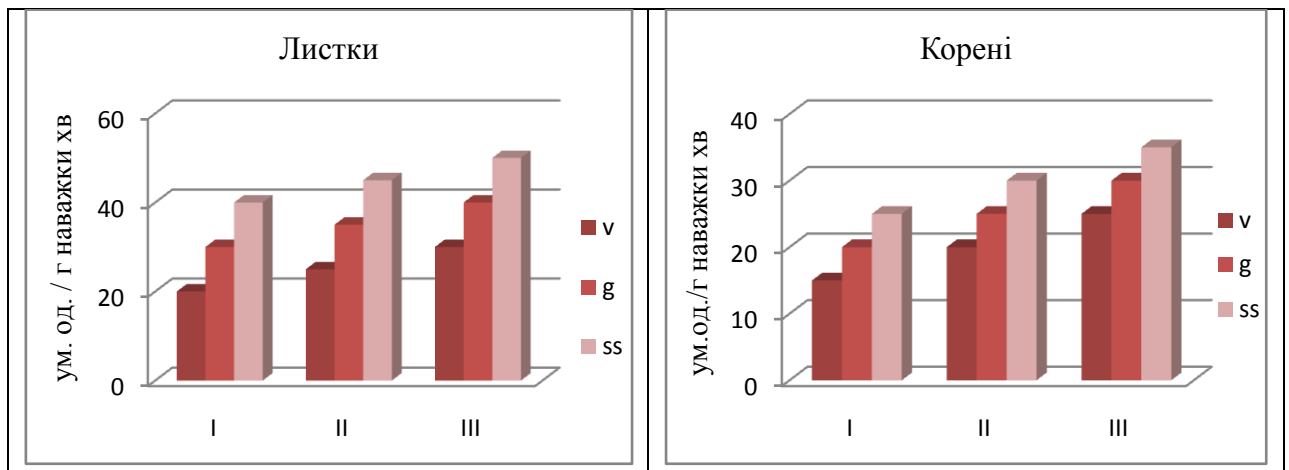


Рис. 4.5.1. Активність пероксидази вегетативних органів *Elytrigia repens* (L.) Nevski з антропогенних фітоценозів: I – Ботсад ДНУ (контроль), II – просп. Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінільний, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани.

У листках віргінільних рослин *Setaria viridis* урбофітоценозів, забруднених вихлопами автотранспорту і промисловими аерополітантами активність пероксидази перевищувала контрольний рівень на 50 і 71 % відповідно. У коренях на цьому етапі онтогенезу активність ферменту був достовірно збільшеним на 40 і 60 %.

Подальше підвищення активності пероксидази зафіксовано у генеративну стадію онтогенезу мишію зеленого у листках на 60-75 %, коренях - 51-62 %.

Максимальні значення притаманні рослинам у субсенільному стані. При цьому рівень активності пероксидази збільшений на 54-65 у надземних і 43-55 % підземних органах урбоєкосистем (рис. 4.5.2).

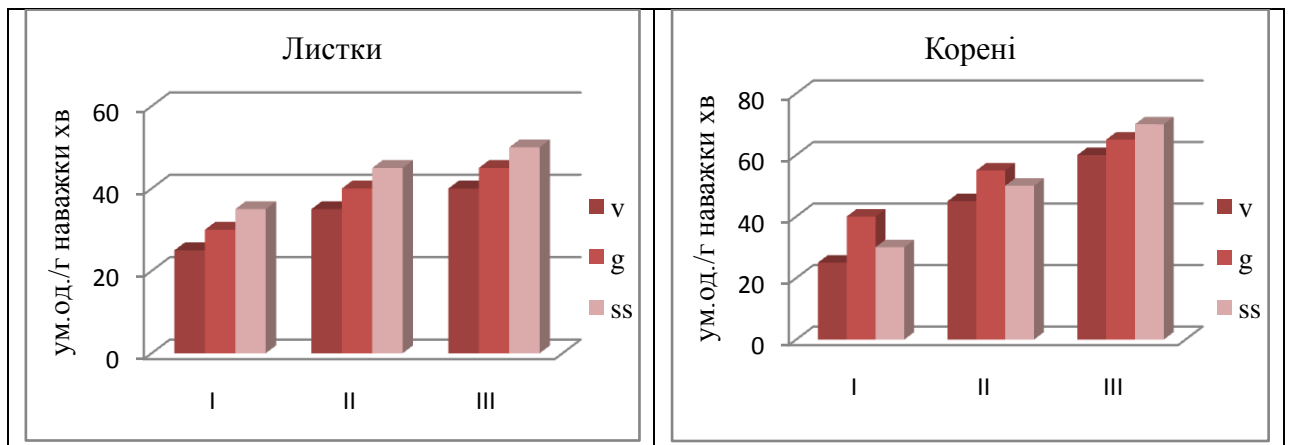


Рис. 4.5.2 Активність пероксидази вегетативних органів *Setaria viridis* (L.) Beauv. з антропогенних фітоценозів: I – ботсад ДНУ (контроль), II – проспект Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінільний, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани.

Як видно з рисунка 4.5.3 у листках і коренях костриці валійської (віргінільна фаза) активність пероксидази за дії викидів автотранспорту перевищувала контрольний рівень відповідно на 42 і 33 %. На фоні промислового забруднення цей показник перевищував контроль на 58 і 48 %.

Генеративний стан *Festuca valesiaca* L. відзначився наростанням активності ПК порівняно з попереднім етапом онтогенезу. У рослин, що зростали на узбіччі просп. Б. Хмельницького відмічена суттєва активація ферменту на 54 (листки) і 43 % (корені). Подібну тенденцію зафіксовано і для зразків, зібраних на території ДМЗ: листки на 65, корені – 52 % вище контролю.

Перехід рослин костриці валійської до субсенільного стану пов'язаний із подальшим наростанням активності пероксидази порівняно з періодом g. Однак слід відмітити, що відносно контрольних зразків перевищення складало 61-74 % (листки) і 52-62 % (корені).

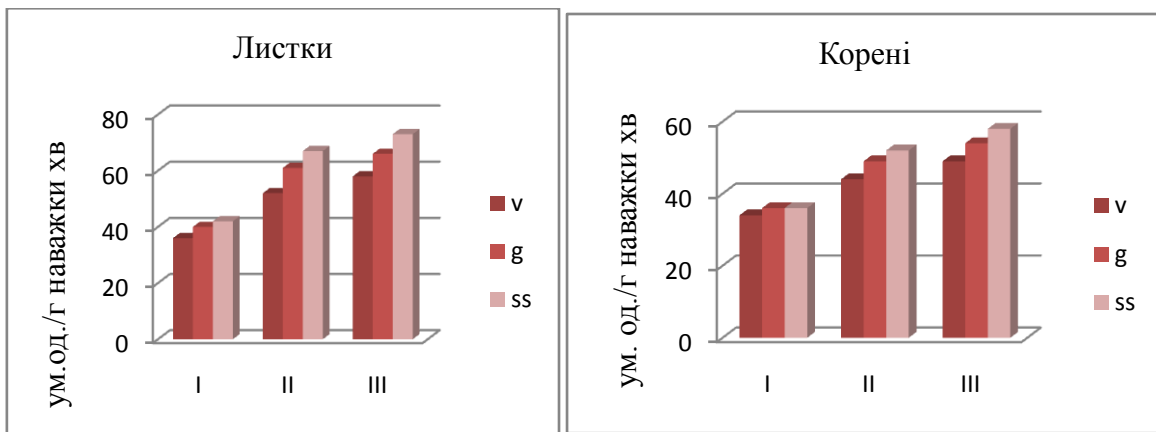


Рис. 4.5.3. Активність пероксидази вегетативних органів *Festuca valesiaca* L. з антропогенних фітоценозів: I – ботсад ДНУ (контроль), II – проспект Б. Хмельницького, III – ДМЗ, v – віргінільний, g – генеративний та ss – субсенільний вікові стани

Отже, у досліджуваних дерноутворюючих рослин незалежно від району зростання протягом онтогенезу відбувається збільшення пероксидазної активності. Хронічний антропогенний вплив поллютантів приводить до суттєвої інтенсифікації ферментативної активності порівняно з контрольними зразками. До того ж найбільш високий рівень активності пероксидази зареєстровано у субсенільних особин. Встановлені факти дозволяють припустити, що пероксидаза приймає активну участь у дезактивації H_2O_2 і відповіді на оксидативний стрес.

Таким чином, одним з механізмів адаптації рослин *Setaria viridis* (L.) Beauv., *Elytrigia repens* (L.) Nevski та *Festuca valesiaca* L. до мінливої напруженості факторів міського середовища є зміна активності ряду ферментативних компонентів антиоксидантного захисту на всіх етапах онтогенетичного розвитку. При посиленні антропогенного навантаження урбоєкосистем відбувалось посилення активності СОД, КАТ і ПК. Характер змін активності досліджуваних ферментів-детоксикаторів активних форм кисню за хронічної дії аерополлютантів дозволив визначати ступінь адаптаційних здібностей пирію повзучого, мишію зеленого, тонконогу вузьколистого, як високий, і дозволив виділити райони з найвищим рівнем

забруднення (ДМЗ). Це, в свою чергу, вносить певний вклад в розшифровку механізмів екологічної стійкості рослин в урбофітоценозах і дає можливість оцінки комплексного впливу різних факторів, а також прогнозувати наслідки такого впливу для подальшої рекомендації використання дослідні види у фітоіндикації та фіторемедіації.

4.6 Акумуляція та розподіл важких металів в компонентах урбанізованих екосистем

Проведені дослідження дозволили встановити, що для більшості досліджених видів газонних злаків найбільший рівень есенціальних та токсичних елементів накопичується саме в підземних органах (кореневій системі). На межі «корінь - надземні вегетативні органи» функціонує еволюційно сформований фізіологічний бар'єр (каспарієві смужки екто- та ендодерми, зв'язування фітохелатинами та металотіонеїнами у вакуолях), що обмежує винесення ксенобіотиків та дозволяє проникати в надземну частину лише лімітованій, відносно безпечній кількості рухомих форм металів. На кожній експериментальній ділянці з'ясовано інтенсивність поглинання та компартменталізації кожного з важких металів модельними видами: тонконогом вузьколистим (*Poa angustifolia* L.), пирієм повзучим (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), кострицею лучною (*Festuca valesiaca* L.) та мишієм зеленим (*Setaria viridis* (L.) P.Beauv.).

Залежно від видових та генотипових особливостей, за характером взаємодії з пулом важких металів едафотопу, досліджувані рослини було диференційовано відповідно до класифікації за Бейкером (Baker, 1981):

- акумулятори - накопичують метали у надземних органах навіть за низького їх вмісту в навколишньому середовищі;
- індикатори - вміст металу в біомасі яких прямо пропорційний (лінійно залежний) його концентрації у субстраті;
- виключники (ексклюдери) - види, в яких підтримується стабільно низька концентрація металів у вегетативних органах.

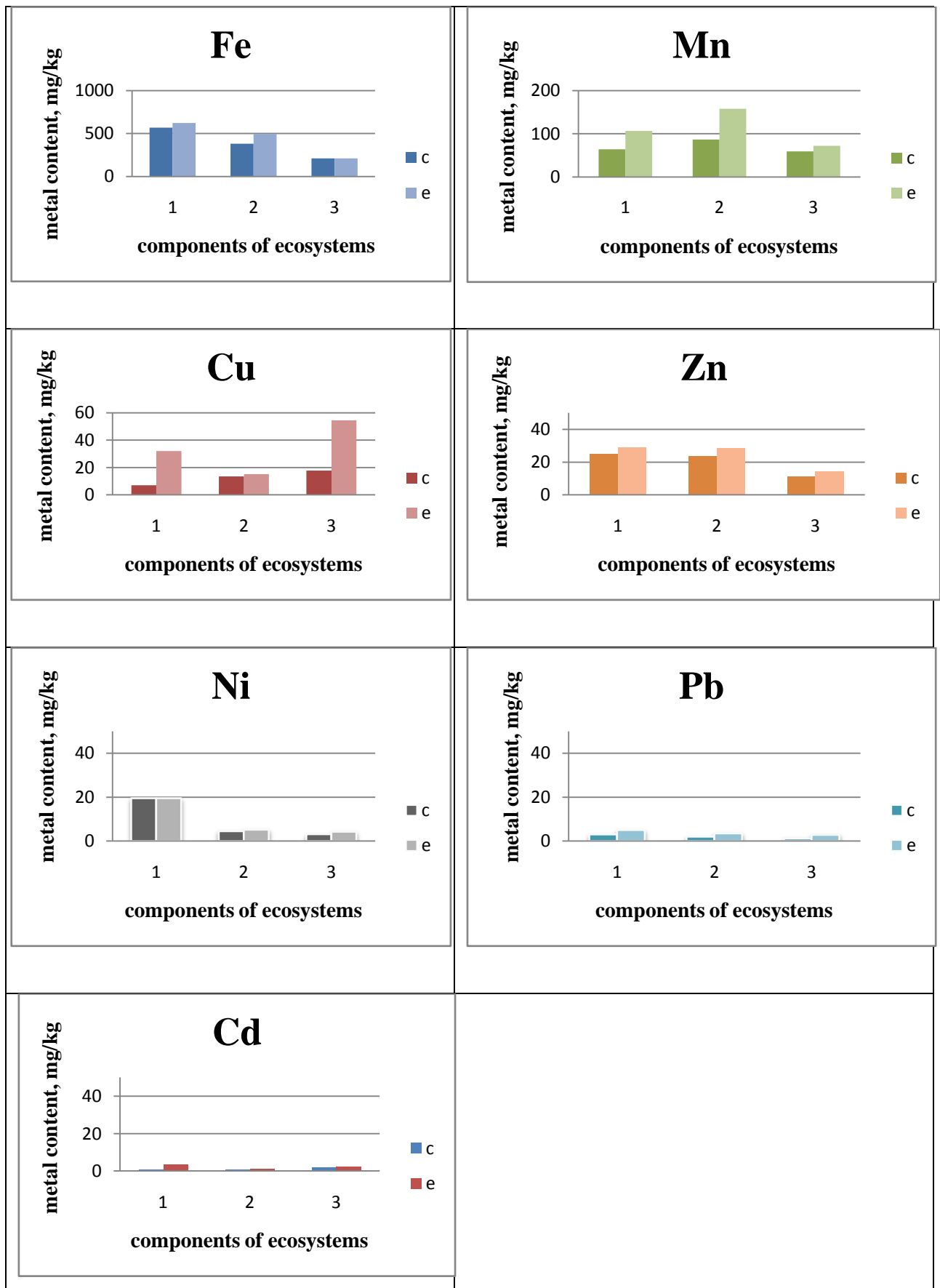


Рис. 4.6.1 Вміст важких металів у різних компонентах екосистем за умов забруднення довкілля (*Poa angustifolia* L.), мг/кг : 1 - ґрунт, 2- підземна частина, 3 - надземна частина; с - контроль, е - дослід.

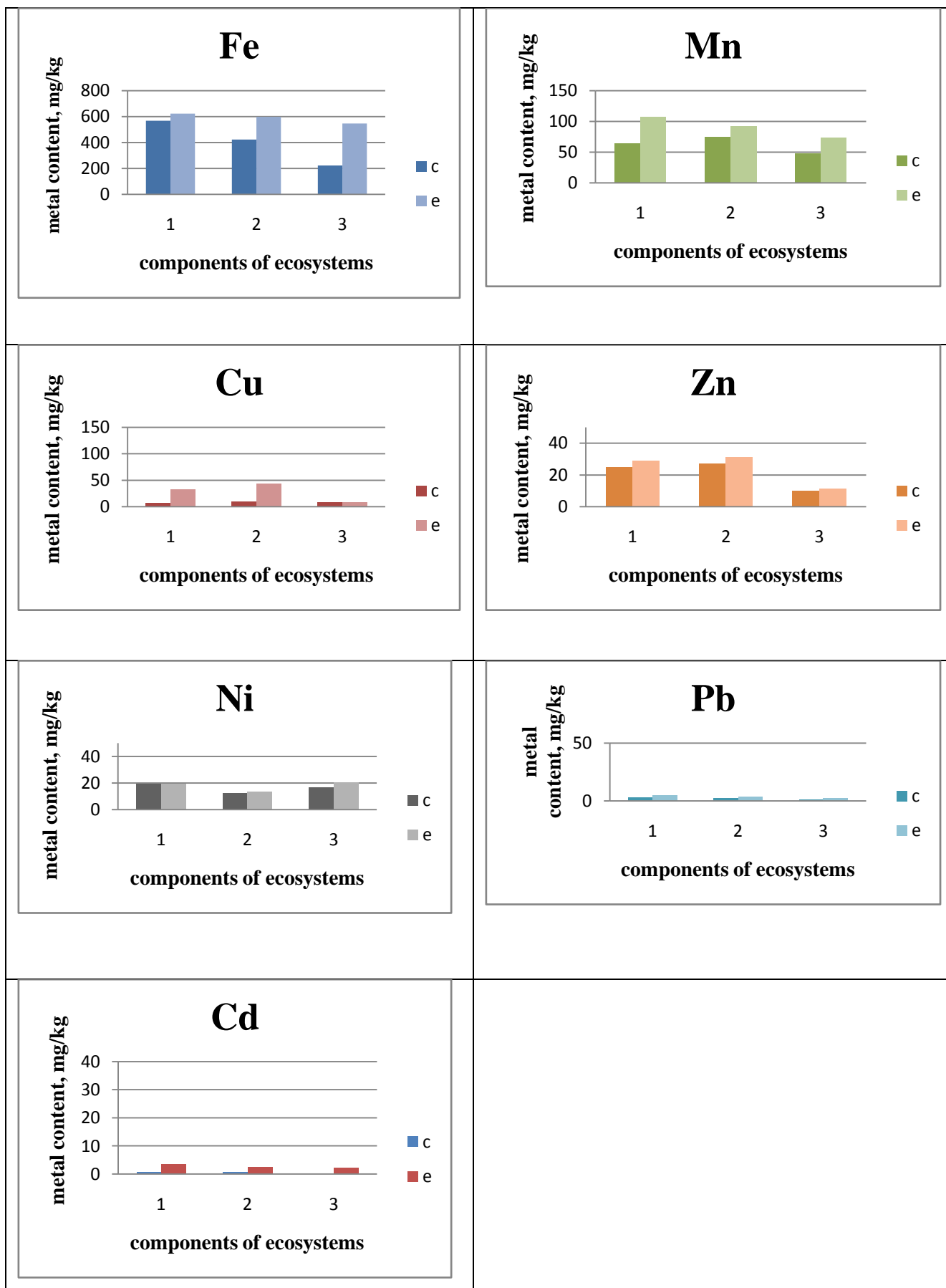


Рис. 4.6.2 Вміст важких металів у різних компонентах екосистем за умов забруднення довкілля (*Elytrigia repens* L.), мг/кг : 1 - ґрунт, 2- підземна частина, 3 - надземна частина; с - контроль, е - дослід.

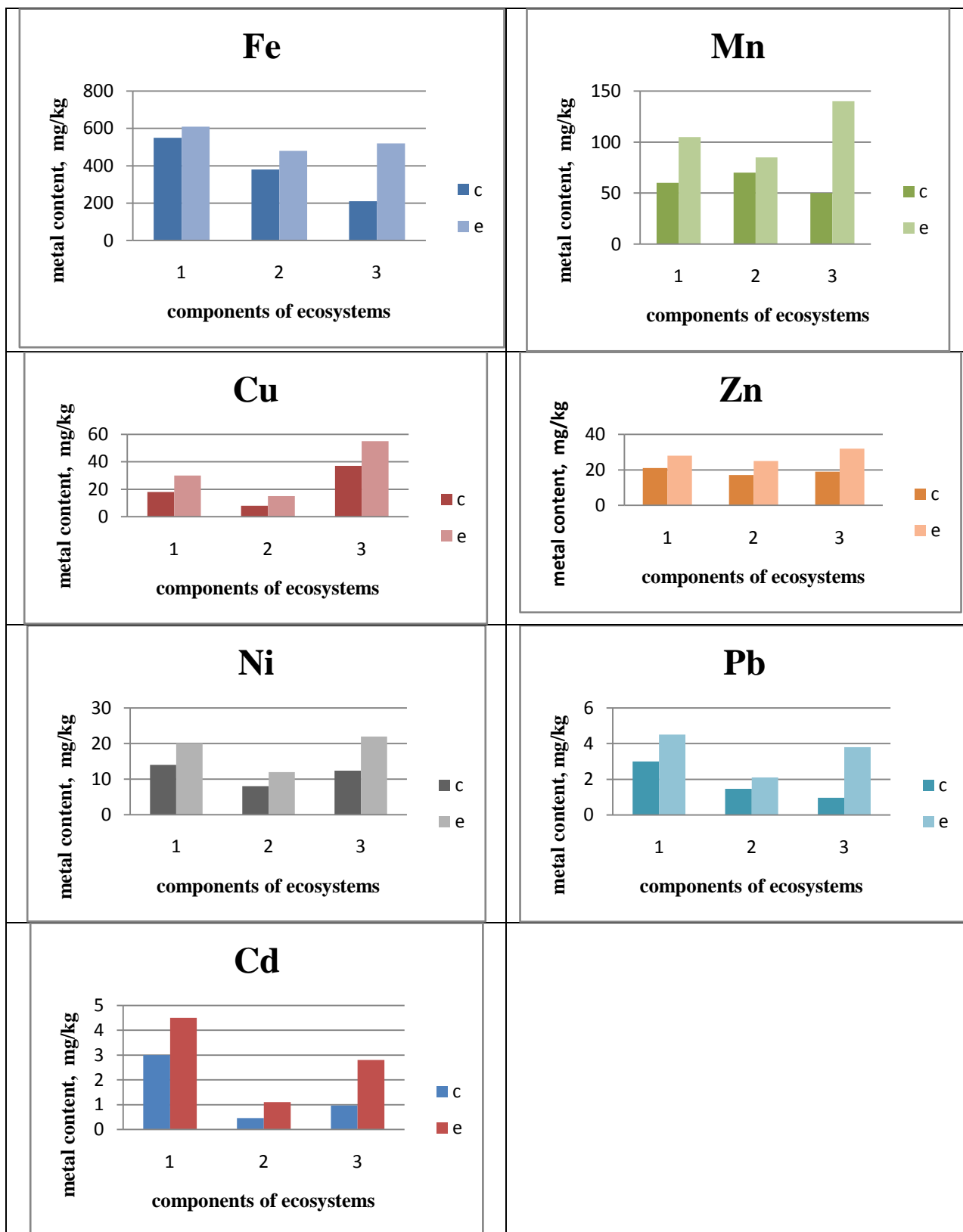


Рис. 4.6.3 Вміст важких металів у різних компонентах екосистем за умов забруднення довкілля (*Setaria viridis* (L.) P.Beauv.), мг/кг : 1 - ґрунт, 2- підземна частина, 3 - надземна частина; с - контроль, е - дослід.

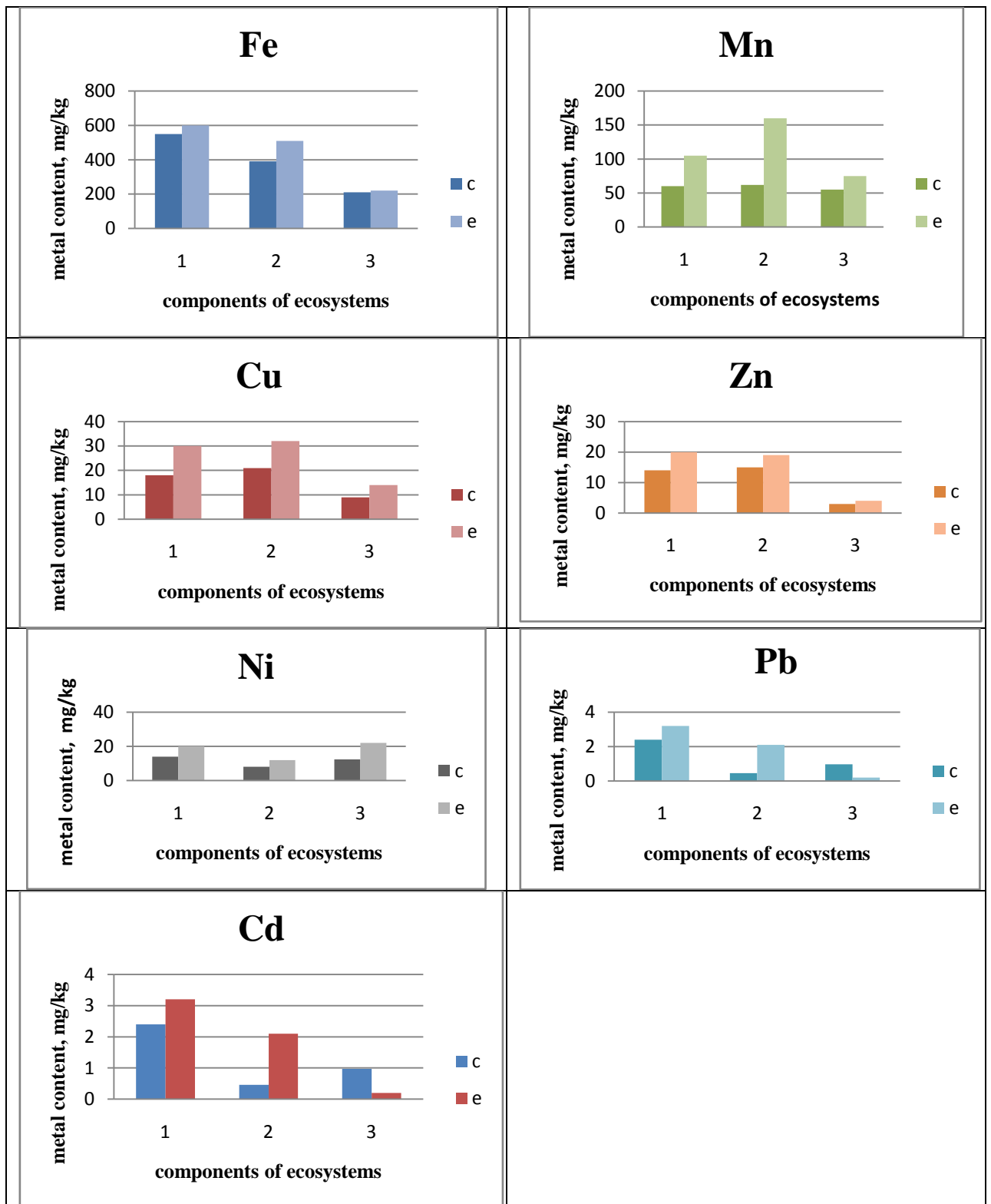


Рис. 4.6.4 Вміст важких металів у різних компонентах екосистем за умов забруднення довкілля (*Festuca valesiaca*), мг/кг : 1 - ґрунт, 2- підземна частина, 3 - надземна частина; с - контроль, е - дослід.

Таку специфіку відгуку вищих рослин широко використовують у практичній фітоіндикації для експрес-оцінки та моніторингу антропогенного

забруднення довкілля промислових центрів. Концентрацію важких металів було детально визначено як у надземній масі (листі), так і в підземній частині (коренях) рослин дослідної та контрольної ділянок. Встановлено чітку міжвидову дивергенцію щодо інтенсивності акумуляції та транслокації елементів.

На контрольних ділянках (Ботанічний сад ДНУ) концентрація марганцю та заліза у коренях *Poa angustifolia* була меншою від аналогічних показників *Elytrigia repens* у 1,1 раз, а цинку та нікелю - у 1,2 раз. У надземній частині (листі) різниця у концентраціях важких металів між цими видами складала для марганцю і кадмію 1,5 раз.

Аналогічна, але більш виражена закономірність відмічена для рослин дослідного варіанту (зони впливу ПрАТ «ДМЗ» та Придніпровської ТЕС). Так, концентрація марганцю та заліза у коренях тонногогу вузьколистого відрізнялася від пирію повзучим у 2,0 раз, а міді - у 2,7 раз.

При залученні до аналізу інших видів злаків було виявлено ще більш контрастні екологічні стратегії. Костриця валіська (*Festuca valesiaca* L.) продемонструвала найвищу бар'єрну здатність серед усіх досліджених злаків, виступивши класичним виключником (ексклюдером). В імпактних промислових зонах вміст заліза та марганцю в її кореневій системі зріс порівняно з контролем у 1,3 та 2,5 раз відповідно, тоді як їх винесення у листя зафіксовано на рівні, близькому до фонового (приріст не перевищував 5–10%). Коефіцієнт транслокації для токсичних Pb та Cd у *Festuca valesiaca* становив менше 0,2–0,3, що свідчить про майже повне локалізування важких металів у підземній біомасі та надійний захист фотосинтетичного апарату.

Діаметрально протилежну фізіолого-біохімічну стратегію виявив однорічний мишій зелений (*Setaria viridis*), який за всіма ознаками класифікується як інтенсивний акумулятор. В умовах хронічного пресингу промислових майданчиків міста бар'єрна функція його кореневої системи виявилася мінімальною: вміст заліза в надземних органах *Setaria viridis* досяг критичних 520 мг/кг, а марганцю - 140 мг/кг, що перевищило показники

контролю майже у 2,5–3,0 раз. На відміну від багаторічних злаків-ексклюдерів, у мишию зеленого вміст металів у листі практично зрівнявся з показниками коренів, що призвело до прямого ксенобіотичного навантаження на мезофіл, викликаючи виражений оксидативний стрес.

Така суттєва різниця в інтенсивності поглинання, компартменталізації та транслокації важких металів у рослин різних видів є вагомим свідченням специфіки ендогенних біохімічних процесів. Вони дозволяють рослинному організму тонко регулювати кількість і потоки цих елементів навіть за абсолютно однакової їхньої концентрації та біодоступності у ґрунті. Подібні закономірності видоспецифічного накопичення та перерозподілу важких металів фітоценозами відмічаються багатьма дослідниками для урбанізованих та промислових територій України та світу, що підтверджує фундаментальний характер виявлених нами адаптаційних механізмів газонних злаків.

Heatmap показників газонних трав

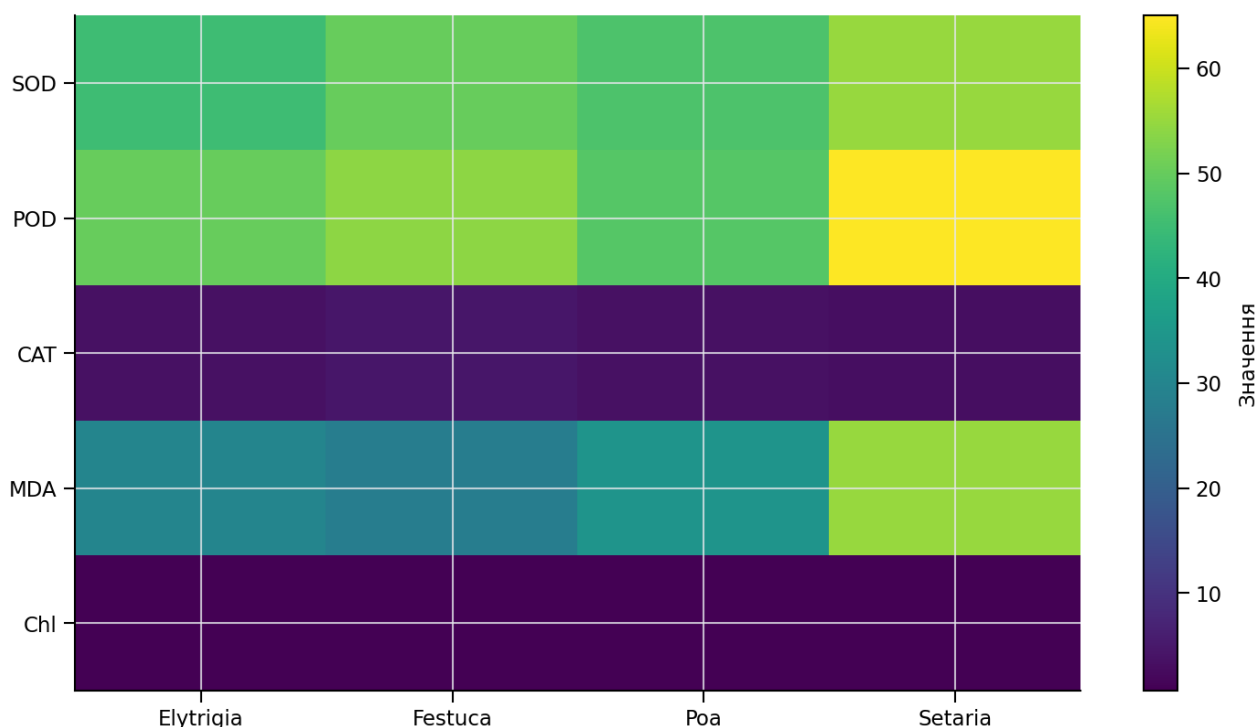


Рис. 4.6.5 Heatmap показників газонних трав

Висновки до розділу 4

1. Газонні трави характеризуються високою стійкістю до техногенного навантаження порівняно з квітково-декоративними. Встановлено, що у газонних рослин важливим механізмом адаптації є здатність обмежувати транслокацію важких металів у надземні органи та акумулювати їх у кореневій системі.
2. Показано, що *Elytrigia repens* та *Festuca valesiaca* характеризуються високою активністю антиоксидантних ферментів, низьким рівнем МДА та стабільністю фізіолого-біохімічних процесів, що свідчить про їх високу стійкість.
3. *Poa angustifolia* демонструє проміжний рівень адаптації, що проявляється у частковій стабілізації антиоксидантної системи. *Setaria viridis* характеризується підвищеним рівнем оксидативного стресу, гіперактивацією ферментативної системи та значним зниженням вмісту фотосинтетичних пігментів, що свідчить про її високу чутливість до дії техногенних факторів.

РОЗДІЛ 5 СТІЙКІСТЬ КВІТКОВО-ДЕКОРАТИВНИХ РОСЛИН

5.1 Квітково-декоративні рослини за дії антропогенного навантаження

Квітково-декоративні рослини становлять основу декоративних, рекреаційних, захисних і меліоративних насаджень. Можливість використання їх в озелененні визначається їхніми вимогами до умов місця зростання та ступенем негативних дій на них стресових факторів в умовах антропогенної трансформації. Вирішальне значення при цьому мають кліматичні та ґрунтові фактори, загальний стан урбоекосистем. Якщо умови зовнішнього середовища дуже відрізняються від потреб рослин, то вони погано ростуть і розвиваються, втрачають декоративність. Тому під час підбору рослин для озеленення важливо знати ґрунтово-кліматичні умови регіону і відношення цієї групи рослин до факторів зовнішнього середовища [132,156,178].

Поглинання хімічних елементів рослинами - процес, який регулюється організмом у залежності від характеру будови і хімічного складу клітинних оболонок у різних рослин; до того ж мембрани володіють біокатаболічною активністю і цим здійснюють спрямований перенос речовин. Пасивна дифузія, хоча і має місце, складає 2-3% від усієї маси засвоєних мінеральних елементів.

Проникнення важких металів у рослини через кореневу систему залежить від їхніх функцій усередині організму. Ті елементи, які входять до складу життєво важливих з'єднань, поглинаються з ґрунту рослинами вибірково, їхні коефіцієнти біологічного поглинання (КБП), що представляють собою відношення вмісту елемента в золі рослини до його вмісту в ґрунті, рівні одиниці або більше. інші елементи, біологічне значення яких важко пояснити, як правило, мають КБП менше одиниці. Однак всі елементи, у тому числі і важкі метали, перш ніж включитися в обмін речовин, проходять наступні етапи: переборюють пектоцелюлозну мембрану клітинної оболонки, потім цитоплазматичну мембрану, товщу цитоплазми і вакуольну мембрану. Цей шлях може бути обумовлений простою дифузією

через пори мембрани по градієнту концентраціях, проходженням через пори мембрани з потоком розчинника, ліпоїдною дифузією, дифузією за участю переносника, обмінною дифузією, активним метаболічним переносом елементів і піноцитозом, що відбувається за рахунок вкраплення плазматичної мембрани в зовнішніх частинах клітини [165,169,175].

Однак регулювання рослиною поглинання зольних елементів не носить абсолютного характеру і має місце тільки при поглинанні з урівноважених розчинів з низькою концентрацією мінеральних речовин. При підвищенні концентрації порушеної іонної рівноваги процесів регуляції в значній мірі подавляється і виникає кореляція між транспірацією і поглинанням іонів.

Зі шляхів надходження важких металів у рослину варто зупинитись на апоплазматичному і симплазматичному. Апоплазматичний шлях проходить по вільному просторі клітинних оболонок і міжклітинників за принципом дифузії і потоку води з розчиненими в ній речовинами. Цим шляхом у рослину можуть надходити випадкові, непотрібні для нормального метаболізму елементи. таким чином напевно, надходять важкі метали, біологічне значення яких не з'ясовано. Ймовірність надходження в рослини цих металів зростає зі збільшенням їхнього вмісту в ґрунтовому розчині [117,129,137,149].

Симплазматичний шлях по безупинній симплазмі між клітинами по плазмодесмам носить виборчий характер. як правило, випадкові чи шкідливі з'єднання й іони не перерозподіляються в організмі рослини цим шляхом, тому що блокуються в момент проникнення в плазму.

Наявність двох шляхів переміщення зольних елементів у рослині визначає різні рівні вмісту важких металів в органах рослинного організму: кореня, стеблах, листках, репродуктивних частинах. У вегетативні частини рослин іони металів надходять переважно апоплазматичним шляхом, а в репродуктивні органи - симплазматичним. Біологічний фільтр симплазми захищає рослини від неконтрольованого накопичення важких металів.

Аналіз золи різних частин рослини показує, що важких металів більше міститься в коренях, потім йдуть стебла і листи і, нарешті, насіння. Провідна система рослин, представлена ксилемою і флоемою, забезпечує різні шляхи транспорту метаболіті і води з розчиненими в ній солями.

У період інтенсивного зростання рослин площа листової поверхні швидко збільшується і концентрація металів на ній, як правило, невелика. Положення трохи змінюється наприкінці вегетації, коли асиміляційний апарат уже сформований і осідання забруднень на його поверхню носить акумулятивний характер; тоді концентрація металів помітно збільшується. Отже, добір рослин з метою визначення в них важких металів із пришляхових ділянок, поблизу підприємств металургії, ТЕС доцільніше проводити наприкінці вегетативного періоду.

Рослини, які ростуть на забруднених ґрунтах можуть боротися з надлишком важких металів такими методами: 1. утримувати важкі метали в коренях або за межами метаболічно важливих органів та структур; 2. знижувати активність надлишкових іонів, переводячи їх в фізіологічно інертні форми; 3. утворювати альтернативні реакції обміну, менш чуттєві до дії важких металів.

Ступінь накопичення елементів у різних видів рослин неоднакова. Рослини, які ростуть на забруднених місцях, відрізняються від представників того ж виду, які ростуть поза дією ксенобіотиків, перш за все толерантністю до токсичних важких металів [96, 106, 115, 134].

Дослідження по визначенню змісту важких металів у ґрунті показують, що їх рівень необов'язково пов'язаний з основним типом забруднення, а може складати фон конкретної території. Цьому сприяє наявність на території Дніпропетровської області великої кількості автомагістралей та промислових підприємств, які є джерелами надходження до екосистем заліза, марганцю, міді, цинку, нікелю, а також свинцю та кадмію.

Наслідки накопичення великих об'ємів важких металів, що перевищують ГДК, відомі наперед: рідко змінюються склад трав'янистого

покриву, відбувається заміна одних видів на інші, на рослинах з'являються некротичні цятки. Масштаби негативної дії промислових викидів пов'язані, перш за все, із специфічними біокліматичними обставинами.

Внаслідок постійного попадання в ґрунт важких металів їх вміст (особливо заліза, марганцю, міді, свинцю, кадмію) на дослідних ділянках значно вищий, ніж у контрольному ґрунті.

Таким чином, реакція рослин на дію комплексного забруднення проявляється перш за все у зміні інтенсивності росту та розвитку і є суцільно інтегративним процесом, що залежить від здатності до адаптації рослин при антропогенній трансформації навколишнього середовища.

5.2. Видові особливості квітково-декоративних рослин до акумуляції важких металів

Важкі метали серед інших поллютантів мають високу токсичність, що зумовлена їх здатністю до накопичення в різних компонентах екосистеми, тому внаслідок надмірної акумуляції спостерігається комплексний вплив на морфологічні та фізіолого-біохімічні показники в рослинному організмі. Квітково-декоративні рослини, які зростають біля доріг з інтенсивним транспортним рухом, зазнають токсичного впливу забруднення важкими металами і накопичують їх через аерогенний шлях. Забруднююча речовина осідає на листовій пластині та через продихи або кутикулу поглинається далі рослиною, або через ґрунт, коли коренева система рослин поглинає накопичені у верхніх шарах ґрунту токсичні речовини. Надмірне накопичення важких металів в тканинах квітково-декоративних рослин призводить до окислювального стресу внаслідок утворення активних форм кисню, що пошкоджують мембрани клітин, дефіциту АТФ, до інгібування активності ферментативних систем. А також, зниження концентрації хлорофілу в листках рослин, яке може служити біоіндикаторною ознакою забруднення навколишнього середовища, призводить до зниження стійкості рослин до хвороб та шкідників. Також, у рослин виникають морфологічні

зміни, такі як затримка росту, некротичні плями на листках, зменшення біомаси, зміна забарвлення квіток, тобто знижується декоративний ефект, який є важливим для озеленення. Стійкість рослин та рівень акумуляції важких металів рослинами залежить від видових особливостей. Одні види здатні накопичувати високі концентрації металів, інші завдяки наявності захисних систем контролю надходження іонів з ґрунту здатні затримувати їх в кореневій системі [27, 30, 37]. Наявність у рослини механізмів детоксикації металів, які надійшли в рослину, шляхом їх хелатування органічними кислотами та білками впливає на функціонування стійких до металів ферментів [31, 36, 51]. Механізми захисту рослин включають також використання наночастинок деяких елементів та органічних добрив [40, 48, 54].

На представлених графіках (Рис. 5.2.1 та Рис. 5.2.2) відображено коефіцієнти транслокації важких металів (Fe, Mn, Cu, Zn, Ni, Pb, Cd) у квітково-декоративних рослин в умовах різного рівня антропогенного навантаження (контроль, ділянка 1 (просп. Б. Хмельницького), ділянка 2 (вул. Набережна Перемоги)).

Аналіз показав чіткі тенденції, а саме зростання значень коефіцієнтів у порівнянні з контролем для більшості металів, що свідчить про посилене переміщення металів і коренів у надземні органи. Стабільно високі значення демонструють залізо (Fe) і марганець (Mn) особливо у видів *Chrysanthemum* та *Tagetes*, що свідчить про активне транспортування металів в надземні органи. Мідь (Cu) і цинк (Zn) демонструють високі значення для видів *Iris hybrida* та *Chrysanthemum*. Нікель показує одну з найвищих транслокацій і високу мобільність у рослинах. Найнижчі значення демонструє кадмій (≈ 0.3 – 0.9), а отже затримується в коренях, що є свідченням захисної реакції рослин. Отримані результати свідчать про видову специфічність до акумуляції і транспорту важких металів. Види, що мають найвищу транслокаційну активність: *Tagetes erecta*, *Chrysanthemum* \times *koreanum*, *Calendula officinalis*, отже ці види можуть бути фітоекстракторами. Середні показники

демонструють *Iris hybrida* *Aster dumosum*, і відповідно найнижча транслокація у *Petunia hybrida* та *Mirabilis jalapa*.

Отримані дані свідчать, що під впливом техногенного навантаження відбувається активація транспортних процесів у рослин. Зростання коефіцієнтів транслокації вказує на збільшення рухливості металів у системі «корінь - надземна частина».

Встановлено, що:

- фізіологічно необхідні елементи (Fe, Mn, Zn, Cu) характеризуються високою мобільністю;
- токсичні метали (Pb, Cd) менш активно транспортуються, однак їх надходження до надземної частини зростає за умов стресу;
- підвищення транслокації пов'язане з порушенням бар'єрної функції кореня.
- Зі збільшенням навантаження зростає транслокація металів, особливо Fe, Zn і Ni, тоді як Cd переважно затримується в коренях. Найактивніше транспортують метали *Tagetes* і *Chrysanthemum*. Особливо важливим є те, що Cd переважно затримується у кореневій системі, що свідчить про один із механізмів захисту рослин від токсичного впливу.

Водночас встановлені відмінності між вмістом металів в підземній та надземній частині, що вказує на активне переміщення металу в надземну частину (Рис.5.2.1). Концентрації інших досліджуваних металів в вегетативних органах *Mirabilis jalapa* в надземній частині виявлено більше ніж в підземній, як і у інших двох видів *Tagetes erecta* та *Calendula officinalis* спостерігається також більший вміст металів в листках порівняно з коренями, так як коефіцієнт транслокації металів перевищує 1.

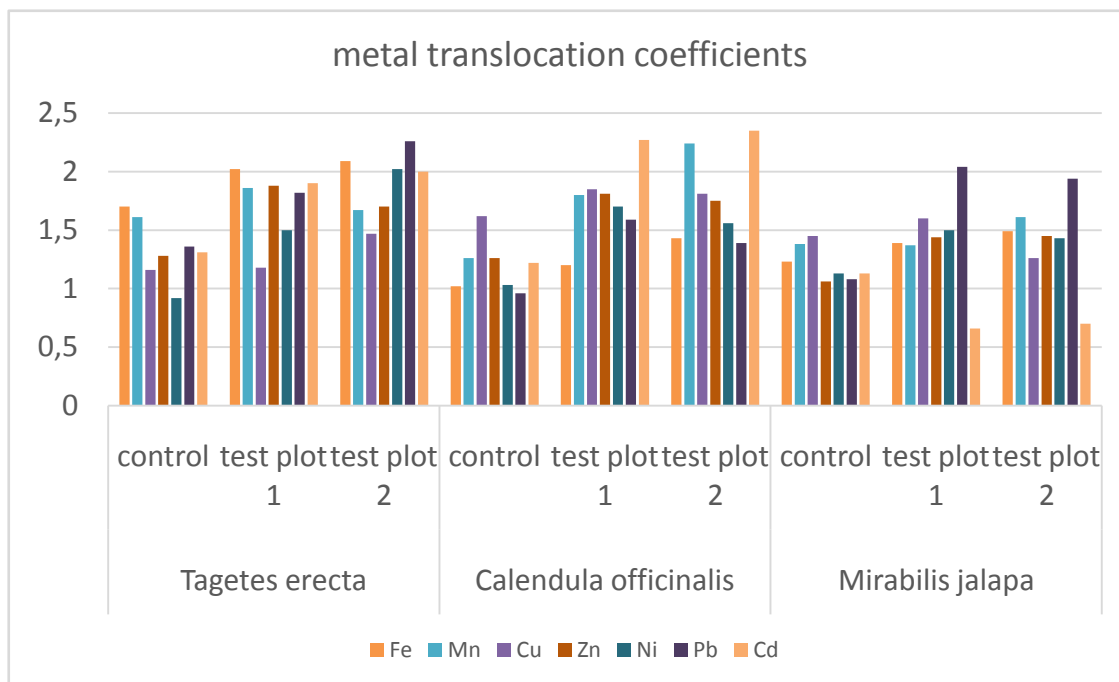


Рис. 5.2.1. Коефіцієнти транслокації важких металів для видів *Tagetes erecta*, *Calendula officinalis* та *Mirabilis jalapa*; дослідна ділянка 1 - просп. Б. Хмельницького, дослідна ділянка 2 - вул. Набережна Перемоги, контроль - Ботсад ДНУ.

Такий показник вказує на високу мобільність металів в рослині, тобто ефективно переміщення металів з кореневої системи до надземних частин, що свідчить про перспективне використання рослин-аккумуляторів в фітореMediaції техногенно забруднених територій. Слід зазначити, що більш стабільні показники виявлено для виду *Tagetes erecta*, що свідчить про ефективну акумуляцію металів цим видом і стійкість до впливу аерополітантів з обох дослідних ділянок. Вид *Calendula officinalis* проявляє більшу видоспецифічність та чутливість до накопичення важких металів порівняно з *Tagetes erecta* та *Mirabilis jalapa*, але коефіцієнти транслокації свідчать про високі акумулятивні властивості даного виду.

Досліджувані види демонструють високу адаптивність до забруднення викидами автотранспорту, тому можуть бути рекомендовані для використання в озелененні примагістральних територій.

Всі три види рослин демонструють здатність до акумуляції важких металів, коефіцієнти транслокації значно зростають в дослідних пробах порівняно з контролем і становлять більше 1, що є характерним для рослин-акумуляторів. За винятком вмісту кадмію для *Mirabilis jalapa*, де коефіцієнт менше 1, що вказує на видові особливості і наявність специфічних захисних механізмів таких як зв'язування металу в клітинах кореня фітохелатинами, накопичення у вакуолях, що блокує транспорт цього елемента з кореня до надземної частини. Отже наявність специфічних механізмів зв'язування Cd в коренях видом *Mirabilis jalapa* може використовуватися для фітореMediaції.

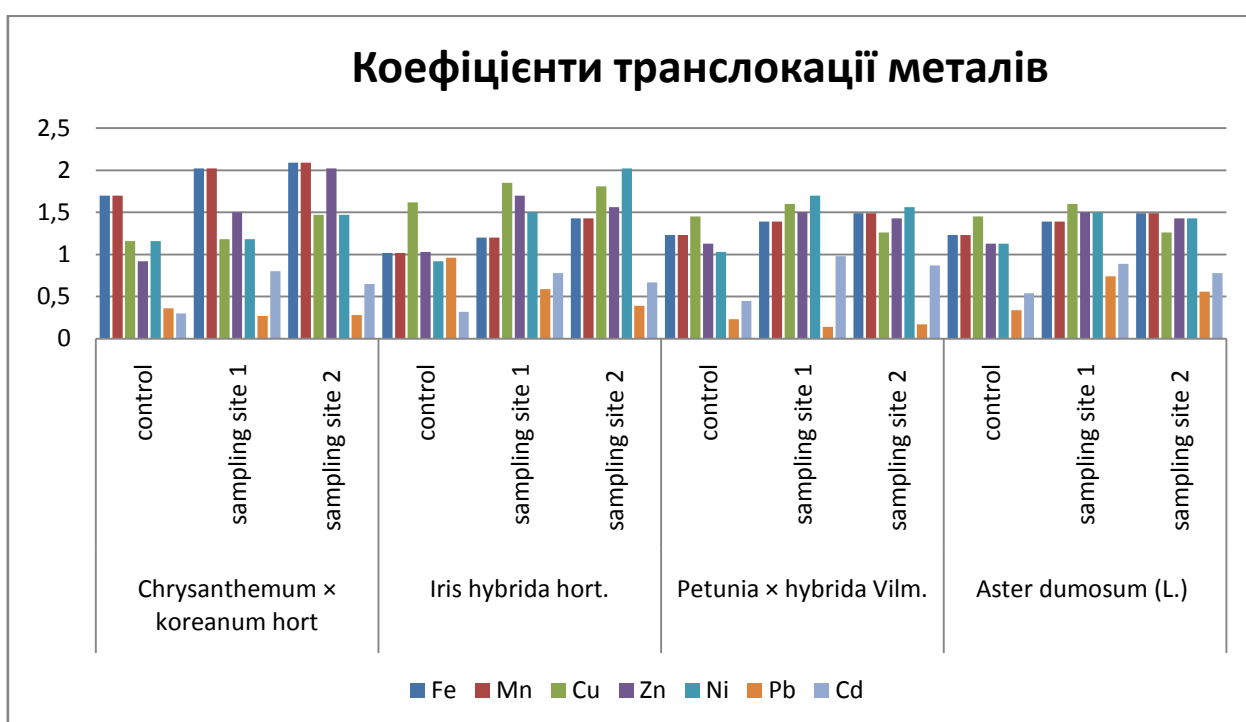


Рис. 5.2.2. Коефіцієнти транслокації важких металів для видів *Chrysanthemum × koreanum*, *Iris hybrida*, *Petunia × hybrida* та *Aster dumosum*; дослідна ділянка 1 - просп. Б. Хмельницького, дослідна ділянка 2 - вул. Набережна Перемоги, контроль - Ботсад ДНУ.

Коефіцієнт транслокації, який відображає співвідношення концентрації елемента в листі до його вмісту в кореневій системі, є ключовим індикатором проникності фізіологічних бар'єрів рослин. Значення $TF > 1,0$ свідчить про активне винесення металу в асиміляційні органи (стратегія акумуляції), тоді

як $TF < 1,0$ маркує ефективне стримування токсикантів підземною біомасою (стратегія виключення).

Загальні тренди та вплив антропогенного навантаження. На Рис. 5.2.2 чітко простежується закономірність: при переході від контрольних умов (контроль) до умов промислового стресу (дослідна ділянка 1 та 2) коефіцієнти транслокації більшості металів динамічно зростають. Це свідчить про те, що за умов високого техногенного пресингу м. Дніпро та літньої кліматичної аридизації внутрішні захисні бар'єри рослин зазнають перевантаження, що призводить до інтенсифікації висхідного транспіраційного току ксенобіотиків у листя.

1. *Chrysanthemum × koreanum* (Хризантема корейська)

Хризантема продемонструвала високу лабільність та виражену тенденцію до посилення транслокації есенціальних елементів під впливом забруднення.

- Залізо (Fe) та Марганець (Mn): на контролі TF цих елементів становив близько 1,7. Проте на дослідних ділянках (ділянка 1, ділянка 2) коефіцієнти стрімко зросли, досягнувши значень $TF > 2,0$. Це вказує на потужне винесення заліза та марганцю в надземну частину, що за умов синергічної дії пилу може викликати порушення в роботі фотосистем.
- Мідь (Cu) та Цинк (Zn): показали стабільну динаміку винесення. Якщо для Cu коефіцієнт залишався в межах 1,2-1,5, то для цинку (Zn) на ділянці 2 зафіксовано різкий стрибок до 2,0.
- Свинець (Pb) та Кадмій (Cd): хризантема виявила надійний кореневий бар'єр щодо найтоксичніших ксенобіотиків. В усіх варіантах TF для Pb утримувався на рівні $< 0,4$, а для Cd - не перевищував 0,3 - 0,8, що демонструє здатність виду ізолювати небезпечні іони в підземній біомасі.

2. *Iris hybrida* (Ірис гібридний)

Завдяки специфіці своєї морфології (наявність потужного товстого кореневища) ірис виявив унікальний характер розподілу металів.

- Бар'єрність щодо заліза та марганцю: на відміну від хризантеми, у ірису ТФ для Fe та Mn на контролі дорівнював 1,0, а на ділянках забруднення зріс дуже помірно - лише до 1,2 - 1,4.
- Висока рухливість Міді (Cu) та Нікелю (Ni): ірис активно транспортує ці елементи в надземну масу. Коефіцієнт транслокації Cu плавно зростає від 1,6 (контроль) до 1,8 (ділянка 2). Для нікелю (Ni) на ділянці 2 зафіксовано максимальне серед усіх об'єктів значення - 2,0.
- Ексклюзія токсикантів: ТФ кадмію та свинцю залишається низьким (< 0,7), що підтверджує фітостабілізуючу роль кореневищ ірису.

3. *Petunia × hybrida* (Петунія гібридна) - Однорічний індикатор

Петунія, як єдиний представлений однорічник, продемонструвала найменшу стабільність фізіологічних бар'єрів, що підтверджує її високу екологічну уразливість.

- Аномальне винесення Нікелю (Ni) та Цинку (Zn): на дослідній ділянці 1 коефіцієнти транслокації Zn, Cu та Ni різко піднімаються до рівнів 1,4-1,6. На ділянці 2 винесення нікелю продовжує зростати, що свідчить про повну відкритість внутрішніх бар'єрів для цього токсиканта.
- Динаміка Кадмію (Cd): петунія виявила найвищий рівень транслокації кадмію серед усіх досліджених видів. На ділянці 1 її ТФ для Cd наблизився до позначки 1,0 (тоді як у багаторічників він утримувався на рівні 0,3-0,5). Це свідчить про те, що кадмій безперешкодно надходить у мезофіл листка петунії, виступаючи головним тригером руйнування хлорофілів та стрімкого зльоту МДА, які було виявлено в її біохімічному профілі.

4. *Aster dumosum* (Айстра кущова)

Айстра продемонструвала найбільш збалансовану, помірну стратегію регулювання потоків металів.

- Есенціальні елементи (Fe, Mn, Cu, Zn, Ni): коефіцієнти транслокації цих елементів на контролі групуються навколо фізіологічної позначки

1,1-1,2. При антропогенному навантаженні (ділянка 1, ділянка 2) спостерігається синхронне і плавне зростання ТФ до меж 1,3-1,6. Айстра гнучко адаптує метаболізм, не допускаючи критичних «вибухових» стрибків акумуляції.

- Свинець (Pb) та Кадмій (Cd): свинець стабільно утримується в корінні (ТФ = 0,3-0,5). Рівень винесення кадмію на ділянці 1 дещо зріс (до 0,85), проте на ділянці 2 рослині вдалося знизити його транслокацію до 0,75, що вказує на включення додаткових ендогенних механізмів детоксикації.

Узагальнюючи отримані результати можна стверджувати, що кожний з елементів має власну специфіку: найвищою рухливістю в системі «корінь - листя» в умовах урбоєкосистеми м. Дніпро характеризуються Fe, Mn, Cu та Zn. Їхні ТФ практично завжди вищі за одиницю, що зумовлено їхньою фізіологічною роллю у фотосинтезі та диханні. Найбільш забар'єреними є небезпечні екотоксиканти - Pb та Cd. Також, відзначимо, що багаторічні культури (*Chrysanthemum*, *Iris*, *Aster*) демонструють вищу бар'єрну здатність та краще контролюють надходження токсикантів (Pb, Cd) у надземні органи. Однорічна *Petunia × hybrida* демонструє високу проникність бар'єрів (особливо для Cd та Ni), що переводить її з категорії стійких видів до групи виражених біоіндикаторів критичного рівня забруднення міського середовища.

Висновок до розділу

Встановлено, що техногенне навантаження спричиняє підвищення коефіцієнтів транслокації важких металів у рослин. Найвищою рухливістю характеризуються Fe, Mn, Zn та Ni, тоді як Cd переважно акумулюється у коренях. Види *Tagetes erecta*, *Chrysanthemum × koreanum* та *Calendula officinalis* демонструють найбільшу здатність до транспорту металів, що свідчить про їх потенціал як фітоіндикаторів та фіторемедіаторів.

5.3 Зміна вмісту фотосинтетичних пігментів та активності антиоксидантної системи квітково-декоративних рослин

Аналіз отриманих експериментальних даних показав, що у контрольних умовах усі досліджувані види рослин характеризуються відносно високим вмістом хлорофілу а та хлорофілу б, що свідчить про нормальне функціонування фотосинтетичного апарату.

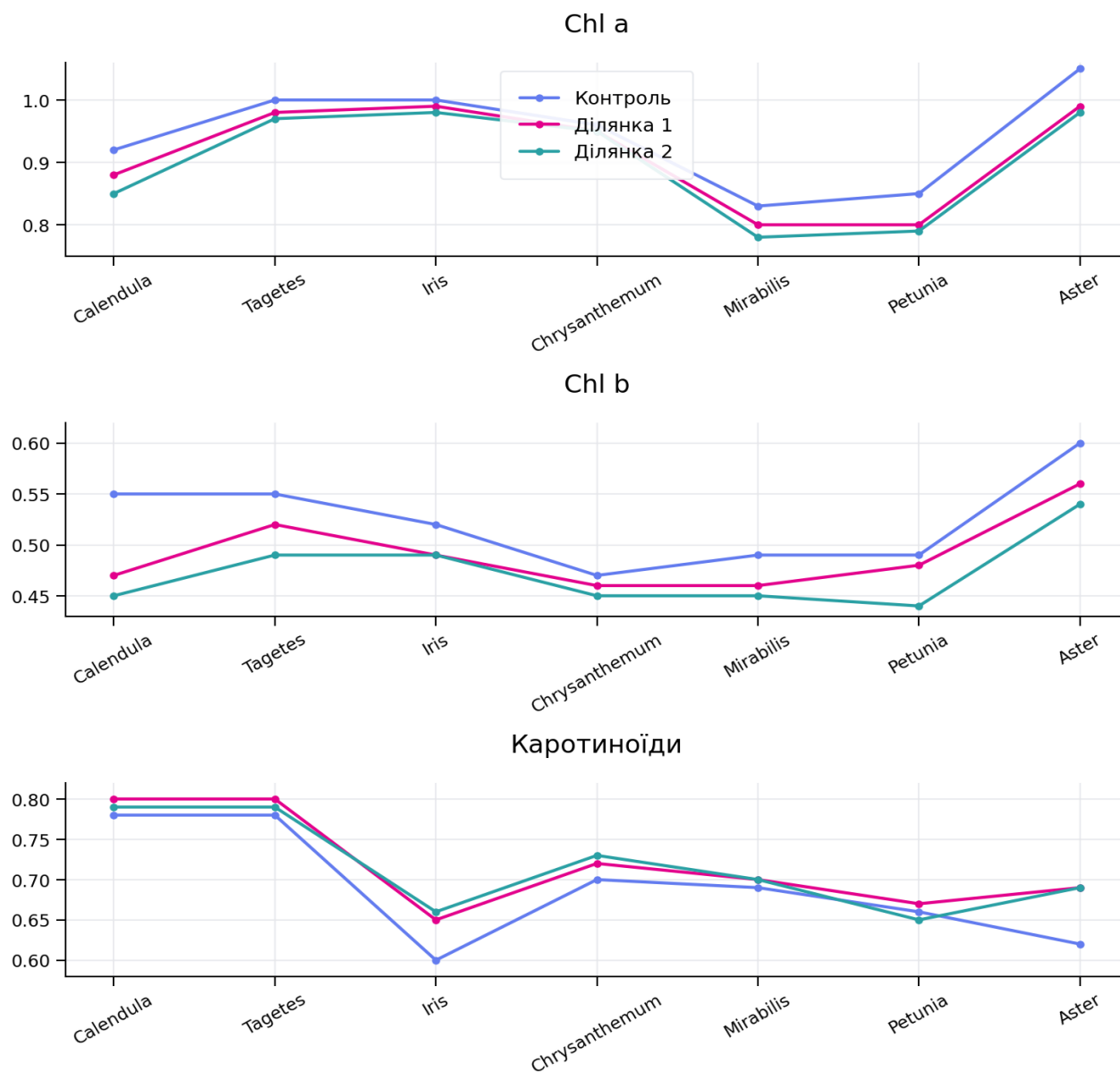


Рис. 5.3.1 Вміст пігментів квітково-декоративних рослин: дослідна ділянка 1 - просп. Б. Хмельницького, дослідна ділянка 2 - вул. Набережна Перемоги, контроль - Ботсад ДНУ.

У дослідних варіантах (ділянка 1 (просп. Б. Хмельницького) та ділянка 2 (вул. Набережна Перемоги)) спостерігається загальна тенденція до зниження вмісту хлорофілів, причому ступінь змін є видоспецифічним. Отримані результати свідчать про те, що досліджувані види рослин по-різному реагують на дію техногенного навантаження, що проявляється у зміні фізіолого-біохімічних показників.

Аналіз пігментного складу досліджуваних рослин показав, що у контрольних умовах усі види характеризуються високим вмістом хлорофілів, що свідчить про нормальне функціонування фотосинтетичного апарату. В умовах дослідних ділянок спостерігається зниження вмісту хлорофілу а та b у більшості видів, що вказує на пригнічення фотосинтетичної активності.

Одночасно відзначено підвищення вмісту каротиноїдів, що свідчить про активацію захисних механізмів рослин у відповідь на стресові фактори середовища. Співвідношення хлорофілу а до b збільшується, що може бути пов'язано з перебудовою світлозбираючих комплексів. Зниження вмісту хлорофілів а і b у дослідних варіантах підтверджує пригнічення фотосинтетичної активності. Водночас збільшення частки каротиноїдів вказує на їх участь у захисті фотосинтетичного апарату від пошкодження.

Найбільш стійкими до змін середовища виявились *Tagetes erecta* та *Chrysanthemum × koreanum*, у яких спостерігаються найменші зміни пігментного складу. Найбільш чутливими є *Petunia hybrida*, *Mirabilis jalapa* та *Aster dumosus*, у яких зафіксовано суттєве зниження вмісту хлорофілів.

Таким чином, встановлено, що зміни пігментного складу рослин (Рис. 5.3.1.) відображають ступінь їх адаптації до умов середовища і можуть бути використані у фітоіндикації як маркер на стрес та забруднення довкілля.

Підвищення коефіцієнтів транслокації важких металів у дослідних варіантах вказує на інтенсивніше надходження металів у надземні органи рослин. Найвищі значення характерні для *Tagetes erecta* та *Chrysanthemum × koreanum*, що може свідчити про їх високу здатність до фітопоглинання.

Зі зростанням вмісту металів спостерігається підвищення рівня малонового діальдегіду, що є показником оксидативного стресу. Це свідчить про ушкодження клітинних мембран внаслідок інтенсифікації процесів перекисного окиснення ліпідів.

Одночасно виявлено підвищення вмісту проліну, що виконує роль осморегулятора та антиоксиданту (Рис. 5.3.2). Це свідчить про активацію адаптаційно-захисних механізмів рослин у відповідь на стресові умови.

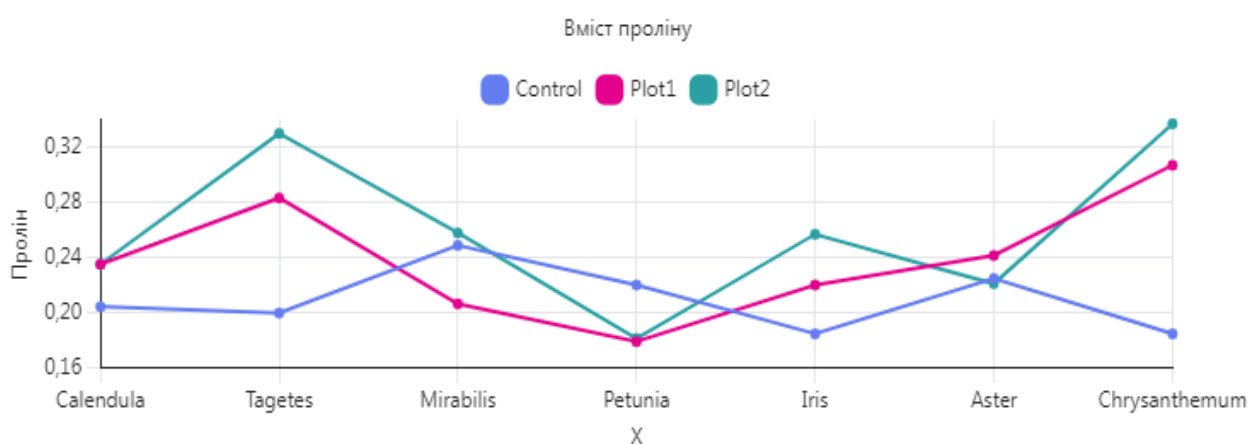


Рис. 5.3.2 дослідження вмісту проліну квітково-декоративних видів, дослідна ділянка 1 - просп. Б. Хмельницького, дослідна ділянка 2 - вул. Набережна Перемоги, контроль - Ботсад ДНУ.

Кореляційний аналіз підтвердив наявність сильного негативного зв'язку між вмістом металів і хлорофілами, а також позитивного зв'язку між металами, проліном і МДА. Це свідчить про те, що важкі метали є головним фактором, який визначає розвиток оксидативного стресу та фізіологічні зміни в рослинах.

Переважає більшість досліджуваних видів характеризується помірним позитивним кореляційним зв'язком між значеннями активності СОД у різних умовах і періодах дослідження.

Таблиця 5.3.1 Коефіцієнти кореляції змін активності супероксиддисмутази (СОД) та вмісту важких металів у досліджуваних видах, дослідна ділянка 1 - просп. Б. Хмельницького, дослідна ділянка 2 - вул. Набережна Перемоги, контроль - Ботсад ДНУ.

№	Найменування видів	X± m _x						r
		2024 р, контроль на ділянка	2025 р, контроль на ділянка	2024 р, дослідна ділянка 1	2025 р, дослідна ділянка 1	2024 р, дослідна ділянка 2	2025 р, дослідна ділянка 2	
1	Iris hybrida hort.	0,084± 0,033	0,380± 0,058	0,153± 0,030	0,228± 0,018	0,425± 0,020	0,368± 0,380	0,64
2	Calendula officinalis L.	0,094± 0,005	0,308± 0,010	0,158± 0,039	0,139± 0,011	0,304± 0,009	0,308± 0,010	0,56
3	Tagetes erecta L	0,063± 0,032	0,328± 0,055	0,161± 0,008	0,484± 0,022	0,254± 0,006	0,328± 0,005	0,52
4	Mirabilis jalapa L.	0,145± 0,006	0,323± 0,007	0,244± 0,007	0,098± 0,016	0,292± 0,003	0,323± 0,007	0,36
5	Petunia × hybrida Vilm.	0,242± 0,020	0,445± 0,013	0,048± 0,070	0,203± 0,044	0,202± 0,008	0,445± 0,013	0,15
6	Aster dumosum (L.)	0,134± 0,079	0,293± 0,067	0,146± 0,003	0,315± 0,005	0,280± 0,040	0,293± 0,067	0,61
7	Chrysanthemum × koreanum hort	0,153± 0,330	0,228± 0,018	0,163± 0,018	0,494± 0,020	0,423± 0,022	0,388± 0,038	0,77

*Примітка r - коефіцієнт кореляції; $p < 0,05$

Найбільш високі значення коефіцієнта кореляції відзначено у Chrysanthemum × koreanum ($r = 0,77$), що свідчить про стабільну реакцію.

Найнижчі значення встановлено у Petunia × hybrida ($r = 0,15$), що може свідчити про нестабільність ферментативних реакцій і більшу чутливість до стресових факторів, при зростанні концентрації ксенобіотиків у субстраті не відбувається збільшення активності СОД, що підтверджує уразливість цього виду в умовах мегаполісу (Таблиця 5.3.1).

Таблиця 5.3.2 Коефіцієнти кореляції змін активності каталази та вмісту важких металів у досліджуваних видах, дослідна ділянка 1 - просп. Б. Хмельницького, дослідна ділянка 2 - вул. Набережна Перемоги, контроль - Ботсад ДНУ.

№	Найменування видів	X ⁺ - m _x						r
		2024 р, контроль на ділянка	2025 р, контроль на ділянка	2024 р, дослідна ділянка 1	2025 р, дослідна ділянка 1	2024 р, дослідна ділянка 2	2025 р, дослідна ділянка 2	
1	<i>Iris hybrida hort.</i>	0,423± 0,022	0,284± 0,002	0,437± 0,006	0,225± 0,006	0,304± 0,008	0,139± 0,004	-0,73
2	<i>Calendula officinalis L.</i>	0,304± 0,009	0,230± 0,018	0,304± 0,008	0,139± 0,004	0,212± 0,010	0,230± 0,018	-0,51
3	<i>Tagetes erecta L.</i>	0,254± 0,006	0,347± 0,010	0,254± 0,006	0,351± 0,016	0,347± 0,001	0,351± 0,001	0,63
4	<i>Mirabilis jalapa L.</i>	0,292± 0,003	0,501± 0,002	0,501± 0,002	0,283± 0,002	0,292± 0,003	0,284± 0,002	-0,43
5	<i>Petunia × hybrida Vilm.</i>	0,202 ± 0,008	0,499 ± 0,005	0,484± 0,309	0,231± 0,006	0,202± 0,008	0,231± 0,006	-0,37
6	<i>Aster dumosum (L.)</i>	0,280 ± 0,040	0,368± 0,036	0,309± 0,005	0,315± 0,002	0,309± 0,005	0,252± 0,012	-0,43
7	<i>Chrysanthemum × koreanum hort</i>	0,437± 0,006	0,225± 0,006	0,304± 0,008	0,139± 0,004	0,423± 0,022	0,284± 0,049	-0,16

*Примітка r - коефіцієнт кореляції; $p < 0,05$

Проведений кореляційний аналіз показав, що для більшості досліджуваних видів характерний негативний зв'язок між зміною активності каталази та умовами зростання. Найбільш виражене зниження встановлено у *Iris hybrida* ($r = -0,73$), що свідчить про суттєві зміни у функціонуванні антиоксидантної системи (Таблиця 5.3.2).

Водночас у *Tagetes erecta* виявлено позитивний кореляційний зв'язок ($r = 0,63$), що може свідчити про більш стабільну реакцію каталази на дію стресових факторів та здатність виду підтримувати високу активність ферментів антиоксидантного захисту в умовах антропогенної трансформації.

Таблиця 5.3.3 Коефіцієнти кореляції змін активності пероксидази та вмісту важких металів у досліджуваних видах, дослідна ділянка 1 - просп. Б. Хмельницького, дослідна ділянка 2 - вул. Набережна Перемоги, контроль - Ботсад ДНУ.

№	Найменування видів	X ⁺ - m _x						r
		2024 р, контроль на ділянка	2025 р, контроль на ділянка	2024 р, дослідна ділянка 1	2025 р, дослідна ділянка 1	2024 р, дослідна ділянка 2	2025 р, дослідна ділянка 2	
1	<i>Iris hybrida hort.</i>	0,143± 0,030	0,230± 0,018	0,157± 0,003	0,228± 0,018	0,412± 0,005	0,388± 0,008	0,85
2	<i>Calendula officinalis L.</i>	0,158± 0,039	0,139± 0,011	0,158± 0,039	0,139± 0,011	0,259± 0,018	0,308± 0,010	0,81
3	<i>Tagetes erecta L.</i>	0,048± 0,007	0,203± 0,044	0,048± 0,007	0,203± 0,044	0,280± 0,040	0,293± 0,067	0,79
4	<i>Mirabilis jalapa L.</i>	0,244± 0,007	0,098± 0,016	0,244± 0,007	0,098± 0,016	0,202± 0,008	0,445± 0,013	0,49
5	<i>Petunia × hybrida Vilm.</i>	0,161± 0,008	0,484± 0,022	0,161± 0,008	0,484± 0,022	0,373± 0,018	0,328± 0,005	0,30
6	<i>Aster dumosum (L.)</i>	0,146± 0,003	0,315± 0,005	0,146± 0,003	0,315± 0,005	0,304± 0,009	0,308± 0,010	0,59
7	<i>Chrysanthemum × koreanum hort</i>	0,153± 0,030	0,228± 0,018	0,153± 0,330	0,228± 0,018	0,254± 0,006	0,328± 0,005	0,83

*Примітка r - коефіцієнт кореляції; p < 0,05

Результати кореляційного аналізу показали, що для більшості досліджуваних видів характерний сильний позитивний зв'язок зміни активності пероксидази залежно від умов зростання (Таблиця 5.3.3). Найбільш високі значення встановлено у *Iris hybrida* (r = 0,85), *Chrysanthemum × koreanum* (r = 0,83), *Calendula officinalis* (r = 0,81) та *Tagetes erecta* (r = 0,79), що свідчить про стабільну реакцію ферменту. Нижчі значення коефіцієнтів кореляції у *Petunia × hybrida* (r = 0,30) свідчать про нестабільність ферментативної відповіді, швидке виснаження резервів антиоксидантного захисту та більшу чутливість до стресових факторів.

Порівняльний аналіз коефіцієнтів кореляції показав (Рис. 5.3.3), що антиоксидантна система рослин характеризується диференційованою реакцією на стресові умови.

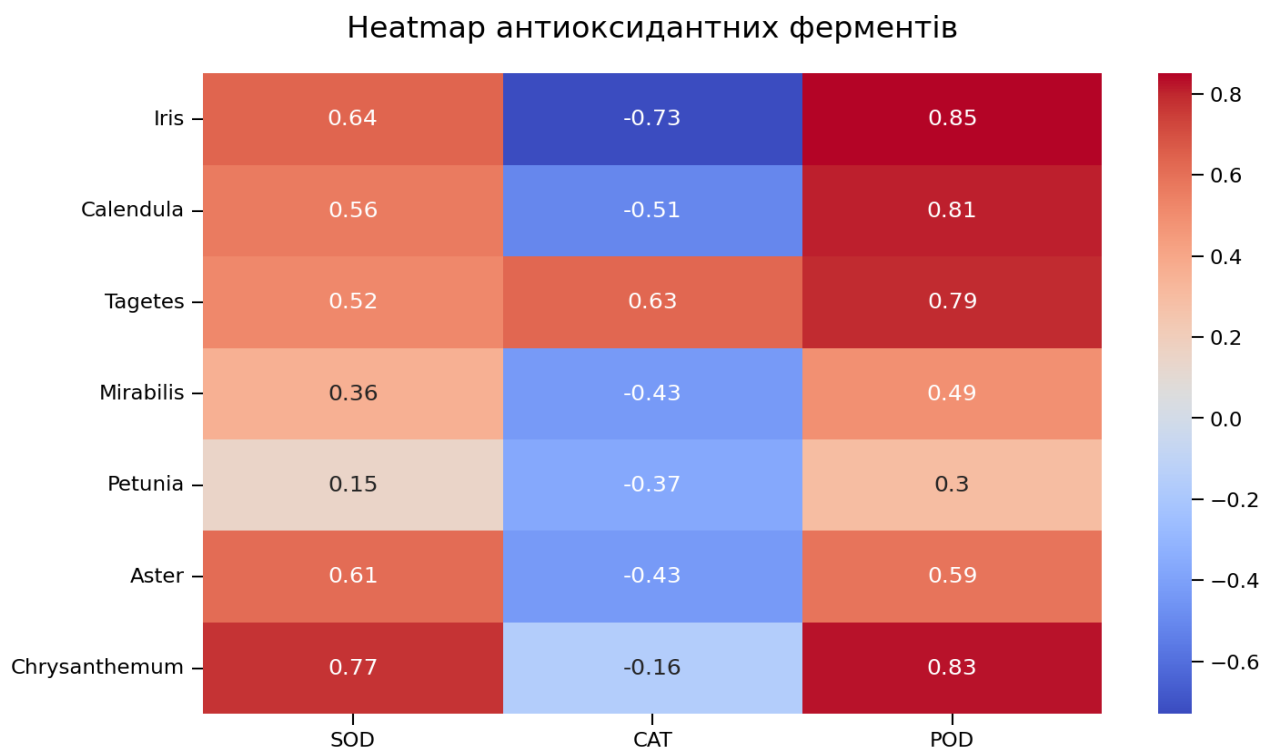


Рис. 5.3.3 Heatmap порівняння коефіцієнтів кореляції антиоксидантних ферментів

Натомість каталаза характеризується більш варіативною динамікою та у більшості випадків демонструє негативний зв'язок, що вказує на складність регуляції антиоксидантних процесів. Найбільш стійкими видами виявлено *Chrysanthemum × koreanum*, *Tagetes erecta* та *Iris hybrida*, тоді як *Petunia × hybrida* характеризується найнижчим рівнем адаптації.

Для оцінки міжвидових відмінностей було побудовано теплову карту (Рис. 5.3.4). Аналіз показав суттєві відмінності у рівні фізіолого-біохімічних показників між досліджуваними видами. Найбільш стійкі види, наприклад *Chrysanthemum × koreanum* характеризуються відносно низьким рівнем проліну та МДА і високим вмістом хлорофілів. Чутливі види (*Petunia × hybrida*) демонструють протилежну тенденцію: підвищення маркерів стресу та зниження фотосинтетичних пігментів. Виявлено обернену залежність між маркерами стресу та фотосинтетичною активністю, що підтверджує адаптивні особливості досліджуваних видів.

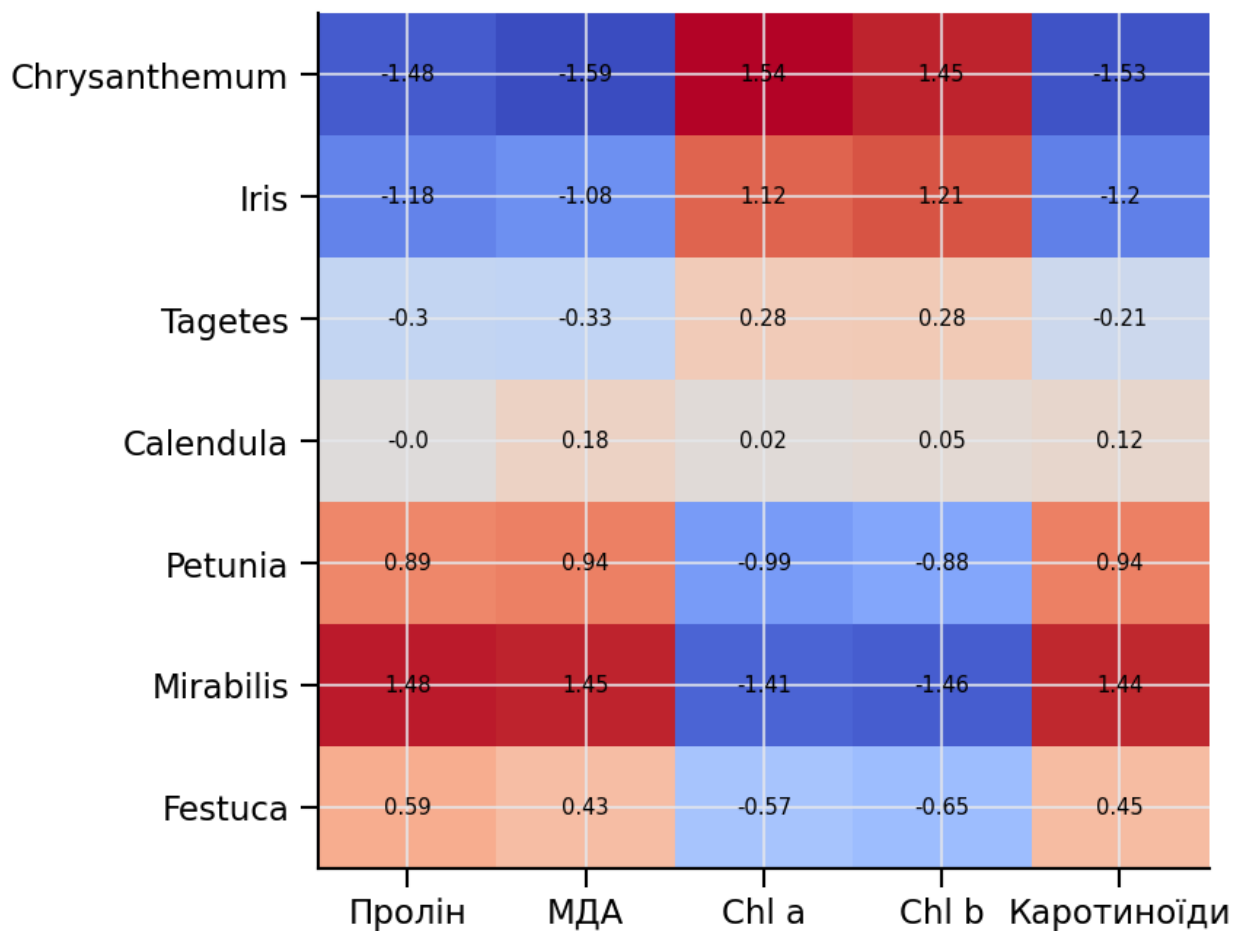


Рис. 5.3.4. Heatmap порівняння видів

Висновки до розділу 5

Комплексне зіставлення результатів спектрофотометрії дозволяє рекомендувати багаторічники *Chrysanthemum × koreanum*, *Iris hybrida* та *Aster dumosum* як високотолерантні асортиментні одиниці для створення довговічних, стійких до спеки та промислового забруднення міських квітників і работок. Натомість висока чутливість пластидного комплексу однорічної *Petunia × hybrida* (за динамікою деградації хлорофілів та зміною індексу Хлорофіли/Каротиноїди) обґрунтовує її використання для фітоіндикації критичних рівнів антропогенного навантаження на урбанізовані території.

Отримані результати активності антиоксидантної системи свідчать, що найбільш стійкими видами виявлено *Chrysanthemum × koreanum*, *Tagetes erecta* та *Iris hybrida*, тоді як *Petunia × hybrida* характеризується найнижчим рівнем адаптації.

ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що в умовах степової зони промислового Придніпров'я розподіл важких металів у вегетативних органах рослин має виражену видоспецифічність. Більшість багаторічних таксонів локалізують основну масу есенціальних та токсичних елементів у підземній біомасі, тоді як однорічні культури характеризуються слабкістю ендогенних бар'єрів на межі «корінь - надземна частина».
2. На основі розрахунку коефіцієнтів транслокації (TF) проведено диференціацію дослідних видів. До групи стійких виключників (TF < 1,0 для Pb, Cd, Cu) віднесено *Festuca valesiaca*, *Elytrigia repens* та *Chrysanthemum × koreanum*. До категорії активних акумуляторів та індикаторів (TF < 1,0 для Ni, Cu, Fe, Mn) віднесено однорічники *Setaria viridis* та *Petunia × hybrida*, у яких іони металів безперешкодно надходять у мезофіл листка.
3. З'ясовано, що ксенобіотичне навантаження викликає деструкцію пластидного комплексу рослин, яка посилюється літньою спекою та пилом. У чутливих видів (*Setaria viridis*, *Petunia × hybrida*) в імпактних зонах вміст хлорофілу а падає на 28–40%, а зниження індексу Chl a/b до 2,1–2,3 свідчить про руйнування світлозбиральних комплексів. Натомість стабільність стійких багаторічників підтримується за рахунок адаптивного посилення синтезу каротиноїдів (на 18–35% відносно контролю), що виконують фотопротекторну функцію.
4. Доведено, що критерієм інтенсивності розвитку оксидативного стресу в урбоекосистемах є накопичення малонового діальдегіду. Критичне зростання вмісту МДА (у 2,0–2,5 раза відносно контролю в Ботанічному саді) маркує деструкцію клітинних мембран у акумулюючих однорічних культур, тоді як у багаторічних ексклюдерів приріст ПОЛ контролюється і не перевищує 15–40%.
5. Виявлено, що біохімічним підґрунтям високої толерантності стійких видів газонних злаків та квітково-декоративних інтродуцентів є стабільна та синхронна активація антиоксидантних ферментів. Захист клітин *Festuca*

valesiaca та *Chrysanthemum × koreanum* уздовж градієнту забруднення забезпечується високим рівнем супероксиддисмутази і пероксидази у поєднанні з рівномірним накопиченням проліну як осмопротектора. У чутливої петунії низькі коефіцієнти кореляції активності ферментів ($r = 0,15$) вказують на зрив адаптації та виснаження антиоксидантної системи захисту.

6. На основі комплексного кореляційного аналізу встановлено, що інтегрований екологічний стрес міського середовища найточніше відображається через систему сполучених маркерів (Важкі метали - МДА - Chl a/b). Для формування стійких елементів міського озеленення та довготривалих газонів в умовах м. Дніпро науково обґрунтовано пріоритетне використання багаторічних злаків-виключників з екрануючим типом кореневої системи.

7. Отримані результати дозволяють рекомендувати використання досліджуваних видів рослин в озелененні урбанізованих територій, у фітоіндикації як біоіндикаторів антропогенного забруднення, в екологічних моніторингах та для фітостабілізації забруднених територій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bielyk, Y.V., Savosko, V.M., & Lykholat, Y.V. (2021). Assessment of the woody plant species vital condition distributed on the devastated lands of the iron ore dump. *Journal of Native and Alien Plant Studies*, (1), 22–27. <https://doi.org/10.37555/2707-3114.1.2021.247351>
2. Alekseeva A., Khromykh N., Lykholat Yu., Boroday E. Specificity of the cuticular waxes composition of the linden leaves depending on light level in tree crown. Біологія рослин і біотехнологія: Третя конференція молодих учених, м. Київ, 16–18 травня 2017 р.: тези доповіді. 2017. С. 19
3. 189. Alexeyeva A. A., Lykholat Y. V., Khromykh N. O., Kovalenko I. M., Boroday E. S. The impact of pollutants on the antioxidant protection of species of the genus *Tilia* L. at different developmental stages. Вісник Дніпропетровського університету. Серія: Біологія, екологія. 2016. № 24 (1). С. 188–192.
4. Бессонова В. П. Методи фітоіндикації в оцінці екологічного стану довкілля. Запоріжжя: Вид-во Запорізького державного університету, 2001. 196 с.
5. Бессонова В. П. Практикум з фізіології рослин. Дніпропетровськ: РВВ ДДАУ, 2006. 316 с.
6. Кабар А. М., Лихолат Ю. В., Лучка Я. О., Давидов В. Р., Бородай Є. С., Тропанець В. Ю. (2017) Активність каталази як показник інтродукції гібридогенних форм кісточкових в умовах степового Придніпров'я. Питання степового лісознавства та лісової рекультивациі земель. Том 45, С. 92-97.
7. Бессонова В. П., Іванченко О. Є., Пономарьова О. А. Одночасний вплив важких металів (Pb^{2+} і Cd^{2+}) та засолення на стан асиміляційного апарату і вміст пігментів фотосинтезу пажитниці багаторічної. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. 2015. Вип. 23, Т. 1. С. 15–20.

8. Бессонова В. П., Пономарьова О.А. Стан підросту і підліску штучного протиерозійного насадження байраку "Військовий" (Північний Степ України). *Питання біоіндикації та екології*. 2017. Вип. 22, № 1. С. 3–19.
9. Бессонова В. П., Приймак О. П. Вплив викидів автотранспорту на вуглеводний обмін у листках декоративних квітникових рослин. *Вісник Дніпропетровського університету*. 2006. № 3/1. С. 12–21.
10. Бешелей С. В. Екологічні властивості *Calamagrostis epigeios* (L.) Roth та його середовищеворна роль на відвалах вугільних шахт (Червоноградський гірничопромисловий район) : дис. на здобуття наук. ст. к. б. н. : 03.00.16. Львів, 2016. 147 с.
11. Белик Ю. В. Екологічні особливості деревно-чагарникових видів техногенних екотопів Кривбасу: кваліфікаційна робота. Кривий Ріг : КДПУ, 2018. 110 с.
12. Белик Ю., Євтушенко Е., Савосько В. Екологічні характеристики деревно-чагарникових видів техногенних екотопів Кривбасу. *Молодь і поступ біології*: програма та тези доповідей XIV Міжнародної наукової конференції студентів і аспірантів, присвяченої 185 річниці від дня народження Б. Дибовського (м. Львів, 10–12 квітня 2018 р.). Львів, 2018. 320 с.
13. Белик Ю.В., Євтушенко Е.О. Таксономічний склад деревно-чагарникових угруповань техноекотопів Кривбасу. *Екологічний вісник Криворіжжя*. 2018. Вип. 3. С. 36–39.
14. Белик Ю.В., Лихолат Ю.В., Савосько В.М. Інтродуценти як компонент спонтанної дендрофлори девастрованих земель. *Глобальні наслідки інтродукції рослин в умовах кліматичних змін*: матеріали міжнародної наукової конференції присвяченої 30-річчю Незалежності України (Київ, 5–7 жовтня 2021 р.). Київ, 2021. С. 67–69.
15. Белик Ю.В., Савосько В. М., Лихолат Ю.В. Вміст хлорофілу в листках деревних видів рослин природно поширених на залізорудному відвалі як маркер екологічних умов девастрованих земель. *Рослини та урбанізація*:

- Матеріали сьомої Міжнародної науково-практичної конференції «Рослини та урбанізація» (Дніпро, 3 березня 2021 р.). Дніпро, 2021. С. 83–85.
- 16.Белик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю.В. Екологічна обумовленість показників життєвості та дендрометричних параметрів дендрофітоценозів природно поширених на девастрованих землях залізорудного відвалу. *Вісник Одеського національного університету. Серія Біологія*. 2022. Т. 7, Вип. 1(50). С. 7 – 23.
- 17.Белик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю.В. Адвентивні деревні види гранітних кар'єрів м. Кривий Ріг. *Екологія – філософія існування людства:збірник тез VI Міжнародної науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених* (Київ, 17–19 квітня 2019 р.). Київ, 2019. С. 9 – 11.
- 18.Белик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю.В. Оцінка життєвого стану деревних видів рослин природно поширених на девастрованих землях залізорудного відвалу. *Охорона біорізноманіття та історико-культурної спадщини у ботанічних садах та дендропарках: матеріали міжнародної наукової конференції присвяченої 225-річчю заснування Національного дендрологічного парку «Софіївка» НАН України*(28–30 вересня 2021 р., Умань). Умань, 2021. С. 24–29.
- 19.Белик Ю. В. Савосько В. М., Лихолат Ю. В. Сучасний стан дендрофітоценозів, природно поширених на девастрованих землях залізорудного відвалу (Кривий Ріг). *Екологічний вісник Криворіжжя*. 2022. Вип.7. С.25–43.
- 20.Белик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю.В., Герман Хайльмайер. Екологічні особливості вмісту макронутрієнтів в листках деревних видів рослин девастрованих земель гірничо-металургійного регіону. *Еко Форум – 2020: збірка тез доповідей IV спеціалізованого міжнародного Запорізького екологічного форуму*(Запоріжжя, 15 – 17 жовтня 2020 р.). Запоріжжя, 2020. 500 с.

- 21.Бєлик Ю.В., Савосько В.М., Лихолат Ю.В., Іжболдін О.О. Варіабельність умісту фенольних сполук у листках дерев, які природно поширені на девастрованих землях залізорудного відвалу. *Питання степового лісознавства та лісової рекультивациі земель*. 2022. Том 51. С. 72 – 85.
- 22.Бородай Є. С., Лихолат Ю. В. Вплив аерополітантів приміагістральних територій на активність антиоксидантних ферментів вегетативних органів дерноутворюючих трав. *Наукові записки. Біологічні науки (Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя)* / за заг.ред.В.І. Шейко.– Ніжин:НДУ ім.М.Гоголя, 2025. № 3. С. 33-43. DOI: <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2025-BN-3-33-43>
- 23.Зміна клімату: наслідки та заходи адаптації: аналіт. доповідь / [С.П. Іванюта, О. О. Коломієць, О. А. Малиновська, Л. М. Якушенко]; за ред. С. П. Іванюти. – К. : НІСД, 2020. – 110 с.
- 24.Гнатів П. С. Адаптація деревних рослин в урбоекосистемі міста Львова. *Лісівнича академія наук України: наукові праці*. Львів, 2003. Вип. 2. С. 108–113.
25. Гнатів П. С. Функціональна адаптація деревних рослин до умов урбанізованого середовища на заході України: автореф. дис. докт. біол. наук: 03.00.16. Чернівці, 2006. 41с.
26. Гнатів П. С. Функціональна діагностика в дендроекології: наукова монографія. Львів: Камула, 2014 . 336 с.
27. Гнатів П. С., Артемовська Д. В. Властивості зовнішнього і внутрішнього середовищ листків дерев як чинники адаптації рослин у трансформованому довкіллі. *Наукові праці Лісівничої академії наук України: збірник наукових праць*. Львів: РВВ НЛТУ України. 2009. Вип. 7. С. 98–103.
- 28.Гнатів П. С., Мазепа М. Г., Артемовська Д. В. Буферні властивості та морфо-анатомічні ознаки листків у техногенних умовах зростання дерев. *Науковий вісник УкрДЛТУ: збірник науково-технічних праць*. 2000. Вип. 10, № 2. С. 97–90.

29. Голубченко В. Ф., Куліджанов Е. В., Станкова О. В. Сучасний стан забезпечення фосфором ґрунтів Одеської області. *Аграрний вісник Причорномор'я*. 2019. Вип. 92. С.3–6.
30. Горон М., Джура Н., Романюк О. Фітотестування як експрес-метод оцінки токсичності нафтозабруднених ґрунтів. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2012. Вип. 58. С.185–192.
31. Григорчук І. Д., Оптасюк О. М., Оптасюк С. В. Біоіндикаційні особливості *Malus Domestica* Вортх. в м. Кам'янці-Подільському. *Вісник Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія Екологія*. 2017. Вип. 2. С. 53–60.
32. Григорчук І. Д., Оптасюк О. М., Оптасюк С. В. Біоіндикаційні особливості *Malus Domestica* Вортх. в м. Кам'янці-Подільському. *Вісник Кам'янець-Подільського національного університету імені Івана Огієнка. Серія Екологія*. 2017. Вип. 2. С. 53–60.
33. Гриньова Я. Г., Криштоп Є. А. Проблеми забруднення навколишнього середовища важкими металами та шляхи їх подолання. *Інженерія природокористування*. 2021. № 1(19). С. 111–119.
34. Шевченко, А., Устінова, І. (2023) Проблеми та методи реновації багатофункціональних парків. Містобудування: проблеми і перспективи розвитку: матеріали п'ятої науково-практичної конференції, присвяченої 40-річчя кафедри містобудування (с. 49-50). 25 квітня, 2023, Київ, Україна.
35. Грищай З. В., Денисенко О. Г. Насіннева продуктивність деревних рослин в умовах забруднення довкілля викидами металургійного підприємства. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. 2011. Вип. 19, Т. 2. С. 40–44.
36. Грищак Л., Барна І., Кодлюк І., Сельська І. Біоіндикаційні методи для потреб системного аналізу якості довкілля. *Конструктивна географія і геоecологія. Наукові записки*. 2017. №2. С.153–165.

37. Гришко В. М. Вміст різних за рухомістю форм цинку в ґрунтах урбанізованих територій. *Біологічні системи*. 2012. Т. 4, Вип.2. С. 149–153.
38. Baranovski, B., Khromykh, N., Karmyzova, L., Ivanko, I., & Lykholat, Y. (2016). Analysis of the alien flora of Dnipropetrovsk Province. *Ukrainian Journal of Ecology*, 6(3), 419-429.
39. Ivanko, I. A., Baranovskyi, B. O., Kabar, A. M., Karmyzova, L. O., Nikolaieva, V. V., Zhykharieva Karas, L. M. (2025). Dendrological diversity and current state of green plantings of Oles Honchar Dnipro National University. *Ecology and Noospherology*, 36(1), 12–21. Retrieved from <https://doi.org/10.15421/032502>
40. Коршиков І. І., Сулова О. П., Петрушкевич Ю. М. Деревні рослини в умовах промислових міст Степу: монографія. Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2020. 456 с.
41. Коршиков І. І., Шевчук Н. Ю., Гусейнова Е. Р. Зміни окрасу і вмісту фотосинтетичних пігментів у хвої *Picea pungens* Engelm. в умовах міських насаджень. *Інтродукція рослин*. 2019. № 1 (81). С. 82–89.
42. Мазур А. Ю., Кучеревський В. В. Роль Криворізького ботанічного саду в озелененні та рекультивації порушених земель Кривбасу. *Науковий вісник УкрДЛТУ*. 2001. Вип. 11.5. С. 193–199.
43. Мазур А. Ю., Кучеревський В. В., Баранець М. О. Криворізький ботанічний сад : науково-довідникове видання. Дніпро: Проспект, 2006. 127 с.
44. Мазур А.Ю., Кучеревський В.В., Шоль Г.Н. Біотехнологія рекультивації залізорудних відвалів шляхом створення стійких трав'янистих рослинних угруповань. *Наука та інновації*. 2015. Т.11, №4. С.41–52.
45. Гришко В. М., Зубровська О. М. Накопичення важких металів та перебіг вільнорадикальних реакцій в асиміляційних органах деревних рослин в умовах забруднення. *Фізіологія рослин і генетика*. 2015. Т. 47, № 1. С. 47–57.

46. Гришко В. М., Піскова О. Особливості акумуляції важких металів у листках деревних рослин при аерогенному забрудненні екотопів. *Інтродукція рослин*. 2014. № 1. С. 93–100.
47. Boroday, Ye.S., Lykholat, T.Yu., Lykholat, Yu.V. (2023). Dynamics of SOD activity and accumulation of TBA-active products in the process of ontogeny of some sod-forming plants in a megalopolis. *Ecology and Noospherology*, 34(2), 112–116. doi:10.15421/032317
48. Григорюк І.П., Яворовський П.П., Лихолат Ю.В. Технології вирощування і біорегуляція стійкості газонних рослин у міському урбанізованому середовищі: монографія Київ: НУБІП України. 2014. 223 с.
49. Kom, YangchenDolma & Karthiyayini, Ramaswamy & Suresh, Surya. (2024). Phytochemical Profiling and Antioxidant Evaluation of *Rhododendron arboreum* Sm leaf and flower: Integrative Analysis using Advanced Analytical Techniques. *Drug development and industrial pharmacy*. 50. 1-56. 10.1080/03639045.2024.2390029.
50. Lykholat, Y. L., Didur, O. O., Khromykh, N. O., Davydov, V. R., Borodai, Y. S., Kravchuk, K. V., & Lykholat, T. Y. (2021). Comparative analysis of the antioxidant capacity and secondary metabolites accumulation in the fruits of rowan (*Sorbus aucuparia* L.) and some closely related species. *Ecology and Noospherology*, 32(1), 3-8. <https://doi.org/10.15421/032101>
51. Лихолат Ю. В., Хромих Н. О., Дідур О. О., Оковитий С. І., Матюха В. Л., Савосько В. М., Лихолат Т. Ю. Сучасний стан антропогенної трансформації екосистем степового Придніпров'я. Кривий Ріг: ФОП Чернявський Д.О., 2019. 146 с.
52. Savosko, Vasyl & Komarova, I & Lykholat, Yuriy & Yevtushenko, E & Lykholat, Tetyana. (2021). Predictive model of heavy metals inputs to soil at Kryvyi Rih District and its use in the training for specialists in the field of Biology. *Journal of Physics: Conference Series*. 1840. 012011. 10.1088/1742-6596/1840/1/012011.

53. Спецпрактикум з фізіології та біохімії рослин. О. М. Вінниченко, В. С. Більчук, Ю. В. Лихолат, Г. С. Россихіна-Галича, Л. В. Шупранова. Дніпропетровськ: ФОП Середняк Т. К., 2014. 224 с.
54. Sanna, Daniele & Fadda, Angela. (2022). Role of the Hydroxyl Radical-Generating System in the Estimation of the Antioxidant Activity of Plant Extracts by Electron Paramagnetic Resonance (EPR). *Molecules*. 27. 4560. 10.3390/molecules27144560.
55. Savosko, Vasyl & Bielyk, Yuliia & Lykholat, Yuriy & Heilmeyer, Hermann & Grygoryuk, Ivan & Khromykh, Nina & Lykholat, Tetyana. (2021). The total content of macronutrients and heavy metals in the soil on devastated lands at Kryvyi Rih Iron Mining & Metallurgical District (Ukraine). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 30. 153-164. 10.15421/112114.
56. Xie X, He Z, Chen N, Tang Z, Wang Q, Cai Y. The Roles of Environmental Factors in Regulation of Oxidative Stress in Plant. *Biomed Res Int*. 2019 May 8;2019:9732325. doi: 10.1155/2019/9732325. PMID: 31205950; PMCID: PMC6530150.
57. Li H, Wang H, Wen W, Yang G. The antioxidant system in *Suaeda salsa* under salt stress. *Plant Signal Behav*. 2020 Jul 2;15(7):1771939. doi: 10.1080/15592324.2020.1771939. Epub 2020 May 28. PMID: 32463323; PMCID: PMC8570744.
58. Приседський Ю. Г., Лихолат Ю. В. Адаптація рослин до антропогенних чинників: монографія ДонНУ імені Василя Стуса. Вінниця: ТОВ "Нілан-ЛТД", 2017. 98 с.
59. Лихолат Ю. В., Лихолат Т. Ю., Квітко М. О., Бородай Є. С., Гальченко В. М. Стан та перспективи відновлення рослинного покриву на техногенних територіях. *Proceedings of the XXXI International Scientific and Practical Conference*. Rotterdam, 06-09 серпня 2024 р., Netherlands. 2024. P. 21-25. URL: <https://isg-konf.com/methodological-aspects-of-education-achievements-andprospects/>

60. Kulbachko, Y. & Boroday, Ye & Lykholat, Tetyana & Lykholat, Yuriy & Lykholat, O & Kvitko, M & Marenkov, Oleh & Yevtushenko, E & Lykholat, Y. (2024). Accumulation of heavy metals by different representatives of biota in the operation zone of the Prydniprovskya thermal power plant. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1415. 012005. 10.1088/1755-1315/1415/1/012005.
61. Kvitko, M. & Lykholat, Tetyana & Lykholat, Yuriy & Lykholat, O & Marenkov, Oleh & Lykholat, Y. (2024). Assessment of changes in the structure of the forest ecosystems for example sanitary woody plantations in the Steppe Dnipro. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1415. 012048. 10.1088/1755-1315/1415/1/012048.
62. Wang P, Liu WC, Han C, Wang S, Bai MY, Song CP. Reactive oxygen species: Multidimensional regulators of plant adaptation to abiotic stress and development. J Integr Plant Biol. 2024 Mar;66(3):330-367. doi: 10.1111/jipb.13601. Epub 2024 Jan 29. PMID: 38116735.
63. Kang, D. G., Lee, J. K., Choi, D. H., Sohn, E. J., Moon, M. K., & Lee, H. S. (2005). Vascular relaxation by the methanol extract of *Sorbus cortex* via NO-cGMP pathway. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 28(5), 860–864.
64. Khromykh, N., Lykholat, Y., Shupranova, L., Kabar, A., Didur, O., Lykholat, T., & Kulbachko, Y. (2018). Interspecific differences of antioxidant ability of introduced *Chaenomeles* species with respect to adaptation to the steppe zone conditions. *Biosystems Diversity*, 26(2), 132–138.
65. Lee, S. O, Lee, H. W., Lee, I. S., & Im, H. G. (2006). The pharmacological potential of *Sorbus commixta cortex* on blood alcohol concentration and hepatic lipid peroxidation in acute alcohol-treated rats. *Journal of Pharmacy and Pharmacology*, 58(5), 685–693.
66. Olszewska, M. A. (2011). Variation in the phenolic content and in vitro antioxidant activity of *Sorbus aucuparia* leaf extracts during vegetation. *Acta Poloniae Pharmaceutica*, 68(6), 937–944. Olszewska, M. A., Nowak, S., Michel, P., Banaszczak, P., & Kicel, A. (2010). Assessment of the content of

- phenolics and antioxidant action of inflorescences and leaves of selected species from the genus *Sorbus sensu stricto*. *Molecules* (Basel, Switzerland), 15(12), 8769–8783. Paganová, V. (2008). Ecology and distribution of service tree *Sorbus domestica* (L.) in Slovakia. *Ekológia* (Bratislava), 27(2), 152–167.
67. Pękal, A., & Pyrzyńska, K. (2014). Evaluation of aluminum complexation reaction for flavonoid content assay. *Food Analytical Methods*, 7, 1776–1782.
- Poljak, I., Kajba, D., Ljubić, I., & Idžojtić, M. (2015). Morphological variability of leaves of *Sorbus domestica* L. in Croatia. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 84(2), 249–259.
68. Prieto, P., Pineda, M., & Aguilar, M. (1999). Spectrophotometric Quantitation of antioxidant capacity through the formation of a phosphomolybdenum complex: specific application to the determination of vitamin E. *Analytical Biochemistry*, 269, 337–341.
69. Pulido, R., Bravo, R. L., & Saura-Calixto, F. (2000). Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing/antioxidant power assay. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48, 3396–3402.
- Raudonė, L., Raudonis, R., Gaivelytė, K., Pukalskas, A., Viškelis, P., Venskutonis, P.R., & Janulis, V. (2015). Phytochemical and antioxidant profiles of leaves from different *Sorbus* L. species. *Natural Products Research*, 29(3), 281–285.
70. Raudonis, R., Raudonė, L., Gaivelytė, K., Viškelis, P., & Janulis, V. (2014). Phenolic and antioxidant profiles of rowan (*Sorbus* L.) fruits. *Natural Products Research*, 28(16), 1231–1240.
71. Albert, K. R., Mikkelsen, T. N., Michelsen, A., Ro-Poulsen, H., & van der Linden, L. (2011). Interactive effects of drought, elevated CO₂ and warming on photosynthetic capacity and photosystem performance in temperate heath plants. *Journal of plant physiology*, 168 (13), 1550-1561. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2011.02.011>
72. Aldesuquy, H., Baka, Z., & Mickky, B. (2014). Kinetin and spermine mediated induction of salt tolerance in wheat plants: Leaf area, photosynthesis

- and chloroplast ultrastructure of flag leaf at ear emergence. *Egyptian journal of basic and applied sciences*, 1(2), 77-87.
<https://doi.org/10.1016/j.ejbas.2014.03.002>
73. Anjum, S. A., Tanveer, M., Hussain, S., Ashraf, U., Khan, I., & Wang, L. (2017). Alteration in growth, leaf gas exchange, and photosynthetic pigments of maize plants under combined cadmium and arsenic stress. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228(1), 13. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3187-2>
74. Arthur, G. D., Aremu, A. O., Kulkarni, M. G., Okem, A., Stirk, W. A., Davies, T. C., & Van Staden, J. (2016). Can the use of natural biostimulants be a potential means of phytoremediating contaminated soils from goldmines in South Africa?. *International journal of phytoremediation*, 18(5), 427-434. <https://doi.org/10.1080/15226514.2015.1109602>
75. Atero-Calvo, S., Magro, F., Masetti, G., & Izquierdo-Ramos M.J. (2025). Humic Substances Enhance Cadmium Tolerance in Lettuce by Enhancing Antioxidant Activity and Photosynthesis Performance. *J Soil Sci Plant Nutr* 25, 2627–2641. <https://doi.org/10.1007/s42729-025-02288-0>.
76. Azizian, A., Amin, S., Maftoun, M., Emam, Y., & Noshadi, M. (2011a). Response of lettuce to Cd-enriched water and irrigation frequencies. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 5(10), 884-893, doi: 10.5897/AJEST11.186.
77. Azizian, A., Amin, S., Noshadi, M., Maftoun, M., & Emam, Y. (2011b). Phytoremediation potential of corn and oat for increased levels of soil cadmium under different irrigation intervals. *Iran Agricultural Research*, 30 (1&2), 47-60.
78. Battacharyya, D., Babgohari, M.Z., Rathor, P., & Prithiviraj, B. (2015). Seaweed extracts as biostimulants in horticulture. *Scientia Horticulturae*, 196, 39–48. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.012>.
79. Cavanagh, J.E., Yi, Z., Gray, C.W., Munir, K., Lehto, N., & Robinson, B.H. (2019). Cadmium uptake by onions, lettuce and spinach in New Zealand: Implications for management to meet regulatory limits. *Science of the Total Environment*, 668, 780-789. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.010.

80. Chen K.S., & Lai H.Y. (2025). Sulfur Mitigates Cadmium Toxicity in Lettuce via Phytochelatins and the AsA-GSH Cycle. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 73(42), 26658-26668. doi: 10.1021/acs.jafc.5c09833.
81. Chen, R., Duan, X., Xu, R., & Zhao, T. (2024). Improving lettuce tolerance to cadmium stress: insights from raw vs. cystamine-modified biochar. *Horticulturae*, 10(12), 1323. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121323>.
82. Chen, X., Tao, H., Wu, Y., & Xu, X. (2022). Effects of Cadmium on metabolism of photosynthetic pigment and photosynthetic system in *Lactuca sativa* L. revealed by physiological and proteomics analysis. *Scientia Horticulturae*, 305, 111371. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111371>
83. Dankaka, A. H., Muhammad, R. H., Abubakar, M. M., & Umar A. B. (2025). Phytoremediation potential of amaranthus viridis and lactuca sativa: assessing physicochemical and nutrient dynamics in heavy metal contaminated soils. *Sahel Journal of Life Sciences FUDMA*, 3(2), 311-326. <https://doi.org/10.33003/sajols-2025-0302-39>.
84. Dawuda, M.M., Liao, W., Hu, L., Yu, J., Xie, J., Calderón-Urrea, A., Wu, Y., & Tang, Z. (2020). Foliar application of abscisic acid mitigates cadmium stress and increases food safety of cadmium-sensitive lettuce (*Lactuca sativa* L.) genotype. *Peer*, 8, e9270. doi: 10.7717/peerj.9270.
85. Di Mola, I., Cozzolino, E., Ottaiano, L., Giordano, M., Roupael, Y., El-Nakhel, C., Leone, V., & Mori, M. (2020). Effect of seaweed (*ecklonia maxima*) extract and legume-derived protein hydrolysate biostimulants on baby leaf lettuce grown on optimal doses of nitrogen under greenhouse conditions. *Australian Journal of Crop Science*, 1456–1464. doi: 10.21475/ajcs.20.14.09.p2511.
86. El-Okkiah, S. A., El-Tahan, A. M., Ibrahim, O. M., Taha, M. A., Korany, S. M., Alsherif, E. A., Abdelgawad.H., Abo Sen T.Z.F., & Sharaf-Eldin, M. A. (2022). Under cadmium stress, silicon has a defensive effect on the morphology, physiology, and anatomy of pea (*Pisum sativum* L.)

- plants. *Frontiers in Plant Science*, 13, 997475.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2022.997475>
87. Fedeli, R., Zhatkanbayeva, Z., Marcelli, R., Zhatkanbayev, Y., Desideri, S., & Loppi, S. (2025) Mitigation of cadmium and copper stress in lettuce: the role of biochar on metal uptake, oxidative stress, and yield. *Plants*, 14, 2255.
<https://doi.org/10.3390/plants14152255>.
88. Gao, F., Zhang, X., Zhang, J., Li, J., Niu, T., Tang, C., Wang, C., & Xie, J. (2022). Zinc oxide nanoparticles improve lettuce (*Lactuca sativa* L.) plant tolerance to cadmium by stimulating antioxidant defense, enhancing lignin content and reducing the metal accumulation and translocation. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1015745. doi: 10.3389/fpls.2022.1015745.
89. Graves S., Piepho H., Dorai-Raj L., & Swihf S. (2023). `_multcompView`: Visualizations of paired comparisons_. R package version 0.1-9.
<https://CRAN.R-project.org/package=multcompView>.
90. Heath, R. L. & Packer, L. (1968). Photoperoxidation in isolated chloroplasts: I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 125(1), 189–198. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1).
91. Jawad Hassan, M., Ali Raza, M., Ur Rehman, S., Ansar, M., Gitari, H., Khan, I., Wajid M., Ahmed M., Abbas Shah G., Peng Y., Li, Z. (2020). Effect of cadmium toxicity on growth, oxidative damage, antioxidant defense system and cadmium accumulation in two sorghum cultivars. *Plants*, 9(11), 1575.
<https://doi.org/10.3390/plants9111575>
92. Jibril, S.A., Hassan, S.A., Ishak, Ch.F., Megat W., & Puteri E., (2017). Cadmium toxicity affects phytochemicals and nutrient elements composition of lettuce (*Lactuca sativa* L.), *Advances in Agriculture*, 1236830, 7 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/1236830>.
93. Korkmaz, H.E., Akgün, M., Kocaman, A. *et al.* (2026) Mitigating cadmium and salinity stress in lettuce through biochar application: impacts on growth and

- nutrient dynamics. *BMC Plant Biology* 26, 339. <https://doi.org/10.1186/s12870-025-08051-y>.
94. Krainiuk, O., Buts, Y., Ponomarenko, R., Asotskyi, V., Darmofal, E., Kalynovskyi, A., & Maniuk, V. (2025). Environmental consequences of military operations in Ukraine on the example of soil research in the Kharkiv region. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 34(2), 304-317. <https://doi.org/10.15421/112526>.
95. Kubier, A., Wilkin, R.T., & Pichler, T. (2019). Cadmium in soils and groundwater: A review. *Applied Geochemistry*, 108, 1 – 16. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104388>.
96. Історія погоди та клімат м. Дніпро. Отримано з https://www.meteoblue.com/uk/weather/historyclimate/weatherarchive/dnipro_ukraine_709930
97. Kumar, G., Nanda, S., Singh, S. K., Kumar, S., Singh, D., Singh, B. N., & Mukherjee, A. (2024). Seaweed extracts: enhancing plant resilience to biotic and abiotic stresses. *Frontiers in Marine Science*, 11, 1457500. <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1457500>
98. Lichtenthaler, H. & Wellburn, A. (1983). Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochemical Society Transactions*, 11(5), 591–592. <http://dx.doi.org/10.1042/bst0110591>.
99. Liu, J., Hou, H., Zhao, L., Sun, Z., & Li, H. (2020) Protective effect of foliar application of sulfur on photosynthesis and antioxidative defense system of rice under the stress of Cd. *Science of The Total Environment*, 710,136230. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136230
100. Luna, C., Garcia-Seffino, L., Arias, C., & Taleisnik, E. (2000). Oxidative stress indicators as selection tools for salt tolerance. *Plant Breeding*.119(4), 341-345. <https://doi.org/10.1046/j.1439-0523.2000.00504.x>.
101. Maldonado-Mateus, L.Y., Cervera-Mata, A., Rufián-Henares, J.Á., Delgado, G., Martín-García, J.M., & Pastoriza, S. (2025). Cocoa and coffee by-products

- for cadmium remediation: an approach to sustainable cocoa cultivation in colombian soils. *Sustainability*, 17, 8381. <https://doi.org/10.3390/su17188381>.
102. Mar S. S., & Okazaki M. (2012). Investigation of Cd contents in several phosphate rocks used for the production of fertilizer. *Microchemical Journal*, 104, 17–21. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2012.03.020>.
103. Midula P., Wiche O., & Andras P. (2017). Concentration and bioavailability of heavy metals, germanium, and rare earth elements in contaminated area of the Davidschacht dump field in Freiberg (Saxony). *Freiberg Ecology online* 2, 101-112.
104. Mittra, P.K., Rahman, M.A., Roy, S.K., Kwon, S.J., Yun, S.H., Kun, C., Zhou, M., Katsube-Tanaka, T., Shiraiwa, T., & Woo, S.H. (2024). Deciphering proteomic mechanisms explaining the role of glutathione as an aid in improving plant fitness and tolerance against cadmium-toxicity in *Brassica napus L.* *J Hazard Mater*, 471,134262. doi: 10.1016/j.jhazmat.2024.134262.
105. Mobin, M., & Khan, N. A. (2007). Photosynthetic activity, pigment composition and antioxidative response of two mustard (*Brassica juncea*) cultivars differing in photosynthetic capacity subjected to cadmium stress. *Journal of Plant Physiology*, 164(5), 601-610. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2006.03.003>
106. Mohammed, M. J., Muhsen, K. A., Awad, K., Shareef, H. J., Jaffer, O. N., & Shakir, M. Z. (2024). Enhancing Physiological Performance of Tissue Culture-Derived Date Palm Plants under Salinity Stress with Kelpak Seaweed Extract. *Basrah Journal Of Date Palm Research*, 23(2), 153-164. <https://orcid.org/0000-0003-2018-6474>
107. Mughunth, R. J., Velmurugan, S., Mohanalakshmi, M., & Vanitha, K. (2024). A review of seaweed extract's potential as a biostimulant to enhance growth and mitigate stress in horticulture crops, *Scientia Horticulturae*, 334,113312. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113312>.
108. Muradoglu, F., Gundogdu, M., Ercisli, S., Encu, T., Balta, F., Jaafar, H. Z., & Zia-Ul-Haq, M. (2015). Cadmium toxicity affects chlorophyll a and b

- content, antioxidant enzyme activities and mineral nutrient accumulation in strawberry. *Biological research*, 48(1), 11. <https://doi.org/10.1186/s40659-015-0001-3>
109. Myśliwa-Kurdziel, B., & Strzałka, K. (2002). Influence of metals on biosynthesis of photosynthetic pigments. In *Physiology and biochemistry of metal toxicity and tolerance in plants* (pp. 201-227). Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2660-3_8.
110. Nekos, A., Medvedeva, Y., & Cherkashyna, N. (2019). Assessment of environmental risks from atmospheric air pollution in industrially developed regions of Ukraine. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 28(3), 511–518. doi: 10.15421/111947.
111. Olivoto T. & Lúcio A.D. (2020). metan: An R package for multienvironment trial analysis. *Methods in Ecology and Evolution* 11(6), 783–789. doi:10.1111/2041-210X.13384.
112. Omoarelojie, L. O., Stirk, W. A., Kulkarni, M. G., & van Staden, J. (2025). Eckols and seaweed-biostimulant (Kelpak®) improve adaptative responses for phosphorus acquisition in white lupin and cucumber seedlings under phosphorus deficiency. *Journal of Applied Phycology*, 37(3), 2173-2185. <https://doi.org/10.1007/s10811-025-03485-1>
113. Parmar, P., Kumari, N., & Sharma, V. (2013). Structural and functional alterations in photosynthetic apparatus of plants under cadmium stress. *Botanical Studies*, 54(1), 45. <https://doi.org/10.1186/1999-3110-54-45>
114. Pastor-Arbulú P, & Rodríguez-Delfin A. (2025). Seaweed-based biostimulant alleviates cadmium-induced physiological stress in tomato (*Solanum lycopersicum L.*). *BMC Plant Biology*, 25(1), 1016. doi: 10.1186/s12870-025-07025-4.
115. Petrushka, K., Petrushka, I., & Yuhman, Y. (2023). Assessment of the impact of military actions on the soil cover at the explosion site by the Nemerov method and the Pearson coefficient case study of the City of Lviv. *Journal of Ecological Engineering*, 24(10), 77–85. <https://doi.org/10.12911/22998993/170078>.

116. Rafique, M., Noreen, Z., Usman, S. *et al.* (2025). Mitigation of adverse effect of cadmium toxicity in lettuce (*Lactuca sativa* L.) through foliar application of chitosan and spermidine. *Scientific Reports*, 15, 9062. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93672-4>.
117. R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>.
118. Rai, R., Agrawal, M., & Agrawal, S. B. (2016). Impact of heavy metals on physiological processes of plants: with special reference to photosynthetic system. In *Plant responses to xenobiotics* (pp. 127-140). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2860-1_6.
119. Raja, B., & Vidya, R. (2023). Application of seaweed extracts to mitigate biotic and abiotic stresses in plants. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 29(5), 641-661. <https://doi.org/10.1007/s12298-023-01313-9>
120. Razanov S., Piddubna A., Gucol G., Symochko L., Kovalova S., Bakhmat M., & Bakhmat O. (2022) Estimation of heavy metals accumulation by vegetables in agroecosystems as one of the main aspects in food security. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*, 12 (3), 159-164. DOI: <https://doi.org/10.31407/ijeec12.320>.
121. Sachdev, S., Ansari, S.A., Ansari, M.I. (2023). Photosynthetic Apparatus: Major Site of Oxidative Damage. In: *Reactive Oxygen Species in Plants*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9884-3_5
122. Sacramento, B. L. d., Neto, A. D. d. A., Alves, A. T., Moura, S. C., & Ribas, R. F. (2018). Photosynthetic parameters as physiological indicators of tolerance to cadmium stress in sunflower genotypes. *Revista Caatinga*, 31(4), 907-916. <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n413rc>.
123. Samet, H., & Çikili, Y. (2026). Nitric oxide-mediated regulation of cadmium stress in lettuce varieties: implications for sustainable food safety and crop production. *Sustainability*, 18(4), 1942. <https://doi.org/10.3390/su18041942>.

124. Schaefer HR, Dennis S, & Fitzpatrick S. 2020. Cadmium: Mitigation strategies to reduce dietary exposure. *Food Science Journal*, 85(2), 260-267. doi: 10.1111/1750-3841.14997.
125. Seyfferth, A. L., Limmer, M. A., Runkle, B. R. K., & Chaney, R. L. (2024). Mitigating toxic metal exposure through leafy greens: A comprehensive review contrasting cadmium and lead in spinach. *GeoHealth*, 8, e2024GH001081. <https://doi.org/10.1029/2024GH001081>.
126. Shi, G., Lu, H., Liu, H., Lou, L., Zhang, P., Song, G., Zhou, H., & Ma, H. (2020). Sulfate application decreases translocation of arsenic and cadmium within wheat (*Triticum aestivum* L.) plant. *Science of Total Environment Journal*, 713, 136665 DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136665.
127. Shukla, P. S., Borza, T., Critchley, A. T., & Prithiviraj, B. (2021). Seaweed-Based Compounds and Products for Sustainable Protection against Plant Pathogens. *Marine Drugs*, 19(2), 59. <https://doi.org/10.3390/md19020059>.
128. Smolders, E. (2001). Cadmium uptake by plants. *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health*, 14(2), 177-183. PMID: 11548068.
129. Sogoni, A., Ngcobo, B. L., Jimoh, M. O., Kambizi, L., & Laubscher, C. P. (2024). Seaweed-Derived Bio-Stimulant (Kelpak[®]) Enhanced the morphophysiological, biochemical, and nutritional quality of salt-stressed spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Horticulturae*, 10(12), 1340. <https://doi.org/10.3390/horticulturae10121340>.
130. Souri, Z., Cardoso, A. A., da-Silva, C. J., de Oliveira, L. M., Dari, B., Sihi, D., & Karimi, N. (2019). Heavy metals and photosynthesis: recent developments. *Photosynthesis, productivity and environmental stress*, 107-134. <https://doi.org/10.1002/9781119501800.ch7>.
131. Stirk, W. A., Rengasamy, K. R., Kulkarni, M. G., & van Staden, J. (2020). Plant biostimulants from seaweed: An overview. *The chemical biology of plant biostimulants*, 31-55. <https://doi.org/10.1002/9781119357254.ch2>.

132. Sujeeth, N., Petrov, V., Guinan, K. J., Rasul, F., O'Sullivan, J. T., & Gechev, T. S. (2022). Current insights into the molecular mode of action of seaweed-based biostimulants and the sustainability of seaweeds as raw material resources. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(14), 7654. <https://doi.org/10.3390/ijms23147654>
133. Tang W., Liang L., Xie Y., Li X., Lin L., Huang Z., Sun B., Sun G., Tu L., Li H., & Tang Y. (2023a) Foliar application of salicylic acid inhibits the cadmium uptake and accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 14,1200106. doi: 10.3389/fpls.2023.1200106.
134. Tang W, Liang L, Li R, et al. (2023b) Effects of exogenous melatonin on the growth and cadmium accumulation of lettuce under cadmium-stress conditions. *Environ Prog Sustainable Energy*, 42(2),e14014. doi:10.1002/ep.14014
135. Tang W, Liang L., Xu K., et al. (2025). Effects of exogenous γ -aminobutyric acid on the growth and cadmium content of lettuce under cadmium-stress conditions. *Environ Prog Sustainable Energy*, 44(2), e14557. doi:10.1002/ep.14557.
136. Tang, X., Pang, Y., Ji, P., Gao, P., Nguyen, T. H., & Tong, Y. A. (2016). Cadmium uptake in above-ground parts of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 125, 102-106. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.11.033>.
137. Tommasino, E., Griffa, S., Grunberg, K., Ribotta, A., Lopez Colomba, E., Carloni, E., Quiroga, M. & Luna, C. M. (2012). Malondialdehyde content as a potential biochemical indicator of tolerant *Cenchrus ciliaris* L. genotypes under heat stress treatment. *Grass and Forage Science*, 67(3), 456-459. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00851.x>.
138. Velasco-Clares, D., Navarro-León, E., Izquierdo-Ramos, M. J., Blasco, B., & Ruiz, J. M. (2025). Enhancing drought tolerance in lettuce: The efficacy of the seaweed-derived biostimulant cytolan® stress applied at different growth stages. *Horticulturae*, 11(2),157. <https://doi.org/10.3390/horticulturae11020157>

139. Voko, M. P., Kulkarni, M. G., Ngoroyemoto, N., Gupta, S., Finnie, J. F., & Van Staden, J. (2022). Vermicompost leachate, seaweed extract and smoke-water alleviate drought stress in cowpea by influencing phytochemicals, compatible solutes and photosynthetic pigments. *Plant Growth Regulation*, 97(2), 327-342. <https://doi.org/10.1007/s10725-022-00815-y>
140. Wang, X., Zhang, J., Shen, J. et al. (2024). The alleviating effect on the growth, chlorophyll synthesis, and biochemical defense system in sunflowers under cadmium stress achieved through foliar application of humic acid. *BMC Plant Biology*, 24, 792. <https://doi.org/10.1186/s12870-024-05516-4>.
141. Wickham H., François R., Henry L., Müller K., & Vaughan D. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.1.1. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>.
142. Wickham. H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. New York: Springer-Verlag.
143. Yazdi, M., Kolahi, M., Kazemi, E., A. & Barnaby, A. (2019). Study of the contamination rate and change in growth features of lettuce (*Lactuca sativa* Linn.) in response to cadmium and a survey of its phytochelatin synthase gene. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 180, 295-308, <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.04.071>.
144. Yin, X., Wang, Y., Wei, L. E., Huang, H., Zhou, C., & Ni, G. (2022). Reduced cadmium (Cd) accumulation in lettuce plants by applying KMnO₄ modified water hyacinth biochar. *Heliyon*, 8(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11304>.
145. Zhang, J., Gao, F., Xie, J., Li, J., Wang, C., Zhang, X., & Han, K. (2024). Zinc oxide nanoparticles reduce cadmium accumulation in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.) by increasing photosynthetic capacity and regulating phenylpropane metabolism, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 285, 117033. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117033>.
146. Zhang, C., Li, T., Wang, Y., Lai, Y., Tianyi Pu, T., & Duan, C. (2025). Mitigating cadmium toxicity in crops: Agronomic measures to regulate uptake

- and tolerance mechanisms, *Plant Stress*, 18, 101085.
<https://doi.org/10.1016/j.stress.2025.101085>.
147. Zheng, R., Sun, G., Li, C., Reid, B.J., Xie, Z., Zhang, B., & Wang, Q. (2017) Mitigating cadmium accumulation in greenhouse lettuce production using biochar. *Environmental Science and Pollution Research*, (7), 6532-6542. doi: 10.1007/s11356-016-8282-9.
148. Zhou, M., Zhi, Y., Dai, Y., Lv, J., Li, Y., & Wu, Z. (2020). The detoxification mechanisms of low-accumulating and non-low-accumulating medicinal plants under Cd and Pb stress. *RSC advances*, 10(71), 43882-43893. DOI: 10.1039/D0RA08254F
149. Zhou, L., Zhou, L., Wu, H., Li, J., Kong, L., & Yang, H. (2024). Effects of applying biochar on soil cadmium immobilisation and cadmium pollution control in lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Agriculture*, 14(7), 1068.
<https://doi.org/10.3390/agriculture14071068>.
150. Zhou, L., Zhou, L., Wu, H., Kong, L., Li, J., Qiao, J., & Chen, L. 2023. Analysis of Cadmium Contamination in Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Using Visible-Near Infrared Reflectance Spectroscopy. *Sensors*, 23, 9562.
<https://doi.org/10.3390/s23239562>.
151. Zorrig, W., El Khouini, A., Ghnaya, T., Davidian, J. C., Abdelly, C., & Berthomieu, P. (2013). Lettuce (*Lactuca sativa*): a species with a high capacity for cadmium (Cd) accumulation and growth stimulation in the presence of low Cd concentrations. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 88(6), 783–789. <https://doi.org/10.1080/14620316.2013.11513039>.
152. Tomović, G., Sabovljević, M. S., Djokić, I., Petrović, P., Djordjević, V., Lazarević, P., Mašić, E., Barudanović, S., Štefănuț, S., Niketić, M., Butorac, B., Pantović, J., Hajrudinović-Bogunić, A., Bogunić, F., Kabaš, E., Vukojičić, S., Kuzmanović, N., Djurović, S. Z., & Buzurović, U. (2020). New records and noteworthy data of plants, algae and fungi in SE Europe and adjacent regions, 2. *Botanica Serbica*, 44(2), 251–259.

153. Welk, E., de Rigo, D., Caudullo, G. (2016). *Sorbus aria* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: SanMiguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, e01e816
- Yin, M. H., Kang, D. G., Choi, D. H., Kwon, T. O., & Lee, H. S. (2005). Screening of vasorelaxant activity of some medicinal plants used in Oriental medicines. *Journal of Ethnopharmacology*, 99(1), 113–117.
154. Yu, T., Lee, Y. J., & Cho, J. Y. (2009). Inhibitory effect of *Sorbus commixta* extract on lipopolysaccharide-induced pro-inflammatory events in macrophages. *Journal of Medicinal Plants Research*, 3(8), 600–607.
155. Yu, T., Lee, Y. J., Jang, H. J., Kim, A. R., Hong, S., Kim, T. W., Kim, M. Y., Lee, J., Lee, Y. G., & Cho, J. Y. (2011). Antiinflammatory activity of *Sorbus commixta* water extract and its molecular inhibitory mechanism. *Journal of Ethnopharmacology*, 134(2), 493–500.
156. Zieliński, J., & Vladimirov, V. (2013). *Sorbus × latifolia* s.l. (Rosaceae) in the Balkan Peninsula and SW Asia. *Phytologia Balcanica*, 19(1), 39–46.
157. Zymone, K., Raudone, L., Raudonis, R., Marksa, M., Ivanauskas, L., & Janulis, V. (2018). Phytochemical profiling of fruit powders of twenty *Sorbus L.* cultivars. *Molecules*, 23(10), 2593.
158. Grodzinskaya A A, Nebesnyi V B, Samchuk A I and Honchar H Y 2019 Content of trace elements, 137cs and 40k in bioindicators and soils from Kyiv (Ukraine) *Journal of Medicinal Plants Studies* 7(5) 115–125 ISSN 1476-069X DOI <https://doi.org/10.22271/plants> URL <https://www.researchgate.net/publication/339875773>
159. Kuraeva I 2014 Form finding of heavy metals in technogenic soil contamination at polyelement poution *Journal of Geology, Geography and Geoecology* 22 214–218 DOI <https://doi.org/10.15421/111427>
160. Kuraieva I V and O S A 2020 Accumulation and redistribution of heavy metals in modern soil covering of protected areas *Geological Journal* 1 58–69 DOI <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2020.1.196979>

161. Kharytonov M M, Stankevich S A, Titarenko O V, Doležalová Weissmannová H, Klimkina I I and Frolova L A 2020 Geostatistical and geospatial assessment of soil pollution with heavy metals in Pavlograd city(Ukraine) *Ecological Questions* 31(2) 1 DOI <https://doi.org/10.12775/eq.2020.01>
162. Krasovskiy S, Kovrov O, Klimkina I, Wiche O and Heilmeyer H 2022 The influence of heavy metals upon the growth on wall barley (*Hordeum murinum*) and Japanese brome (*Bromus japonicus*) *Environment Protection Technologies* 68 184–192 DOI <https://doi.org/10.33271/crpnmu/68.184>
163. Lykholat T Y, Lykholat O A, Marenkov O M, Kvitko M O, Panfilova H L, Savosko V N, Belic Y V, Vyshnikina O V and Lykholat Y V 2022 Proteolytic processes in organism of different age rats exposed to xenoestrogens *Journal of Physics: Conference Series* 2288(1) 012013 DOI <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2288/1/012013>
164. Kvitko M O, Savosko V M, Lykholat Y V, Holubiev M I, Hrygoruk I P, Lykholat O A, Kofan I M, Chuvasova N O, Yevtushenko E O, Lykholat T Y, Marenkov O M and Ovchinnikova Y Y. 2022 Assessment of the ecological hybrid threat to industrial area in connection with the vital state of artificial woody plantations in Kryvyi Rih District (Ukraine) *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 1049 012046 DOI <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012046>
165. Протопопова В. В., Мосякін С. Л., Шевера М. В. Вплив неаборигенних видів рослин на біоту України // Оцінка і напрямки зменшення загроз біорізноманіття / Ред.О. Дудкін. К.: Хімджест, 2003.С. 129–155.
166. Протопопова В. В., Шевера М. В. Інвазійні види у флорі України. I. Група високо активних видів. *Geo & Bio*. 2019. Т. 17. С. 116-135.
167. Протопопова В. В., Шевера М.В. Адвентизація природних та штучних екосистем Причорномор'я. *Наук. вісн. нац. аграрн. ун-ту*. 2006. Т. 93. С. 78–88.

168. Савосько В. М. Вплив комбінацій меліорантів і термінів їхньої дії на фітотоксичність субстратів шахтних хвостосховищ Криворіжжя. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2012. Вип.60. С. 208–214.
169. Савосько В. М. Ґрунтознавство : опорний конспект лекцій. Кривий Ріг : Криворізький державний педагогічний університет, 2021. 306 с.
170. Савосько В. М., Домшина К. М., Савосько В. В. Морфологічні особливості листків берези повислої культурдендроценозів степу в умовах промислового міста. *Питання біоіндикації та екології*. Запоріжжя: ЗНУ, 2013. Вип.18. № 2. С. 121–133.
171. Савосько В. М., Католіченко О. М. Флюктуюча асиметрія листків берези повислої в умовах аеротехногенного забруднення Криворіжжя. *Питання біоіндикації та екології*. 2014. Вип. 19, № 2. С. 90-92.
172. Савосько В. М., Квітко М. О. Сучасний життєвий стан лісових культурфітоценозів Криворіжжя. *Вісник Львівського університету. Серія біологічна*. 2017. Вип. 75. С. 75–82.
173. Савосько В. М., Квітко М. О. Сучасний стан основних насаджень Довгинцівського дендропарку (м. Кривий Ріг). *Промышленная ботаника*. 2014. Вип. 14. С. 106-114.
174. Савосько В. М., Лихолат Ю. В., Белик Ю. В. Апофітні та адвентивні деревні види на девастрованих землях гранітних кар'єрів Криворіжжя. Біоресурси і природокористування. 2019. Том 11, № 1–2. С. 14–25. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/bio2019.01.002>
175. Савосько В., Лихолат Ю., Домшина К. Екологічна та геологічна зумовленість поширення дерев і чагарників на девастрованих землях Криворіжжя. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2018. № 27 (1). С. 116-130. DOI: 10.15421/111837.
176. Савосько В.М., Лихолат Ю.В., Белик Ю.В., Григорюк І.П. Апофітні та адвентивні деревні види на девастрованих землях гранітних кар'єрів Криворіжжя. *Біоресурси і природокористування*. 2019. Т. 11, № 1–2. С. 14–25. DOI: <http://dx.doi.org/10.31548/bio2019.01.002>.

177. Кучерявий В. П., Кучерявий В. С. Озеленення населених місць : підруч. для студ. вищ. навч. закладів. Львів: Видавництво «Новий Світ-2000», 2023. 666 с.
178. Тарасов В. В. Флора Дніпропетровської та Запорізької областей. Судинні рослини. Біолого-екологічна характеристика видів: Моногр. Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2005. 276 с.
179. Тарнопільський П. Б., Жадан І. В. Лісотипологічна характеристика насаджень на рекультивованих землях Юрківського вуглерозрізу Черкаської області. Лісівництво і агролісомеліорація. 2020. Вип. 137. С. 51–61.
180. Твардовська М. О., Коновалюк І. І., Листван К. В., Андрєєв І. О., Кунах В. А. Вміст фенольних сполук та флавоноїдів у рослинах *in vitro* та культурі тканин *Deschampsia antarctica* E. Desv. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2020. Т.26. С.276–281.
181. Харитонов М. М., Бабенко М. Г., Мартинова Н. В. Комплексна екологічна оцінка створення енергетичних плантацій на рекультивованих землях: монографія. Дніпро: ЛІРА, 2020. 192с.
182. Шоль Г.Н. Потенційно інвазійні адвентивні види в урбанофлорі Кривого Рогу. *Рослини та урбанізація: матеріали сьомої міжнародної науково-практичної конференції (3 березня 2018 р., м. Дніпро)*. Дніпро, 2018. С. 29–31.
183. Шоль Г.Н., Кучеревський В.В. Охорона видів родини *Fabaceae* Lindl. флори України у колекціях Криворізького ботанічного саду. *Флорологія та фітосозологія*. 2014. Т. 3–4. С. 282–287.
184. Savosko, V., Komarova, I., Lykholat, Y., Yevtushenko, E., & Lykholat, T. (2021). Predictive model of heavy metals inputs to soil at Kryvyi Rih District and its use in the training for specialists in the field of Biology. *Journal of Physics: Conference Series*, 1840(1), 012011. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1840/1/012011>

185. Savosko, V., Lykholat, Yu., Komarova, I. & Yevtushenko, E. (2022). The impact of forest plant communities on the content of heavy metals in soil profiles of the iron ore mining area, Kryvyi Rih District, Ukraine. *Baltic Forestry* 28(1), 631. Retrieved from <https://doi.org/10.46490/BF631>
186. Savosko, V., Tovstolyak, N., Lykholat, Y. & Grygoryuk, I. (2020). Structure and diversity of urban park stands at Kryvyi Rih ore-mining & metallurgical district, central Ukraine. *Agriculture and Forestry*, 66(3), 105–126. Retrieved from <https://www.agricultforest.ac.me/data/2020093010%20Savosko%20et%20al%20final.pdf> DOI: [10.17707/AgricultForest.66.3.10](https://doi.org/10.17707/AgricultForest.66.3.10)
187. Лихолат Ю. В., Хромих Н. О., Шупранова Л. В. Закономірності адаптації аборигенних та інтродукованих видів деревних рослин до мінливих умов Степового Придніпров'я : монографія. Суми : ФОП Цьома С. П., 2018. 186 с. URL: <https://repo.snau.edu.ua/handle/123456789/6520> (дата звернення: 09.12.2025).
188. Лихолат Ю. В. Еколого-фізіологічні основи формування дернових покривів в умовах степової зони України (стійкість, динаміка, техногенез) : автореф. дис. д-ра біол. наук : 03.00.16 «Екологія» ; Чернівецький нац. ун-т ім. Ю. Федьковича. Чернівці, 2003. 40 с.
189. Зайцева І. О., Долгова Л. Г. Фізіолого-біохімічні основи інтродукції деревних рослин у Степовому Придніпров'ї: монографія. Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту, 2010. 388 с.
190. Зайцева І. О., Опанасенко В. Ф. (2008) Путівник по ботанічному саду ДНУ. Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 112 с.
191. Грицай З. В., Шупранова Л. В. Вплив викидів Придніпровської ТЕС м. Дніпропетровськ на анатомічні показники стебла дворічного пагона представників роду *Tilia*. Вісник Дніпропетровського університету. Біологія, екологія. 2015. № 23 (2). С. 255–230.
192. Lykholat Y. V., Khromykh N. A., Ivan'ko I. A., Matyukha V. L., Kravets S. S., Didur O. O., Alexeyeva A. A., Shupranova L. V. Assessment and

- prediction of the invasiveness of some alien plants under the climatic changes in the steppe Dnieper. *Biosyst. Divers.* 2017. № 25 (1). P. 52–59.
193. Kharytonov, M., Berezniak, O., Klimkina, I., Rula, I., Eckart, S., Guhl, S., & Wiche, O. (2025). Prerequisites for using trace and rare-earth elements from the fly ash of Ukrainian thermal power stations. *International Journal of Environmental Studies*, 82(2), 1–11.
194. Kvitko, M. O., Savosko, V. M., Lykholat, Y. V., Holubiev, M. I., Hrygoruk, I. P., Lykholat, O. A. Ovchinnikova Y. Y. (2022). Assessment of the ecological hybrid threat to industrial area in connection with the vital state of artificial woody plantations in Kryvyi Rih District (Ukraine). *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 1049, 012046. Retrieved from <http://biblio.umsf.dp.ua/jspui/handle/123456789/6098>
195. Травлеєв А. П., Зверковський В. М., Білова Н. А., Котович О. В., Вернигора С. А. Новітні принципи відновлення порушених промисловістю екосистем у межах виконання кластерної інноваційної програми НАН України «Родючість ґрунтів». *Екологія та ноосферологія*. 2011. Т. 22, № 3–4. С. 28–42.
196. Кліматичні зміни в Україні: виклики та адаптація: Звіт Міністерства екології та природних ресурсів України. Київ, 2020.
197. Ramirez-Valiente J. A., Koehler K., Cavender-Bares J. Climatic origins predict variations in photoprotective leaf pigments in response to drought and low temperature in live oaks (*Quercus series virentes*). *Tree Physiology*. 2015. № 35 (1). P. 521–534.
198. Ranieri A., Castagna A., Baldam B., Soldatini G.F. Iron deficiency differently affects peroxidase isoforms in sunflower. *J. Exp. Bot.* 2001. № 52 (354). P. 25–35.
199. Eurostat. (2016). Urban Europe: Statistics on Cities, Towns and Suburbs. Publications office of the European Union. <https://doi.org/10.2785/91120>

200. Hajzeri, A. (2021). The management of urban parks and its contribution to social interactions. *Arboricultural Journal*, 43(3): 187–195.
<https://doi.org/10.1080/03071375.2020.1829373>
201. Kulish, T. (2022). Spatial variation of soil temperature fields in a urban park. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1049(1):[012056].
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012056>

ДОДАТОК А

Список публікацій здобувача, в яких висвітлено основні наукові результати дисертації.

У виданнях, які включені до наукометричних баз Web of Science та Scopus:

1. Alexeyeva, A. A., Lykholat, Y. V., Khromykh, N. O., Kovalenko, I. M., & **Boroday, E. S.** (2016). The impact of pollutants on the antioxidant protection of species of the genus *Tilia* at different developmental stages. *Visnyk of Dnipropetrovsk University, Biology, Ecology*, 24(1), 188–192.

DOI: <https://doi.org/10.15421/011623>

<https://ecology.dp.ua/index.php/ECO/article/view/011623> (**Web of Science**)

(особистий внесок **Boroday, E. S.**: проведення експериментального дослідження; Alexeyeva, A. A. збір та обробка біо-морфологічних, фітоценотичних даних, написання статті; Lykholat Y. V.: концепція дослідження, формулювання висновків; Khromykh, N. O., загальне керівництво дослідженням, аналіз отриманих результатів; Kovalenko, I. M.,: аналітична обробка даних)

2. Kulbachko Y. L., Boroday Ye. S., Lykholat T. Y., Lykholat O. A., **Kvitko M. O.**, Marenkov O. M., Yevtushenko E. O. Lykholat Y. V. Accumulation of heavy metals by different representatives of biota in the operation zone of the Prydniprovsk thermal power plant. *The Materials of the V International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2024)*, Kryvyi Rih, Ukraine, May 21–24, 2024. Sustainable Futures in a Changing World – Reflections from the 5th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2024). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1415.

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1415/1/012005>

DOI [10.1088/1755-1315/1415/1/012005](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012005) (**Scopus**)

*(особистий внесок **Boroday Ye. S.**: збір та обробка біо-морфологічних даних, Kulbachko Y. L., збір та обробка зоологічних даних; Lykholat T. Y.: проведення експериментального дослідження, аналіз отриманих результатів; Kvitko M. O. аналітичний огляд фітоценотичних даних, аналіз отриманих даних; Lykholat O. A.: написання статті, формулювання висновків; Marenkov O. M.: аналітичний огляд; Yevtushenko E. O.: корекція протоколу відбору матеріалів; Lykholat Y. V.: концепція дослідження).*

Публікації в наукових фахових виданнях України

3. **Бородай Є. С.,** Лихолат Ю. В. Вплив аерополютантів примаргістральних територій на активність антиоксидантних ферментів вегетативних органів дерноутворюючих трав. Наукові записки. Біологічні науки (Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя) / за заг.ред.В.І. Шейко.– Ніжин:НДУ ім.М.Гоголя, 2025. № 3. С. 33-43.

DOI: <https://doi.org/10.31654/2786-8478-2025-BN-3-33-43>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка біологічного матеріалу, аналіз результатів, статистична обробка даних, написання статті; Лихолат Ю. В.: концепція та дизайн дослідження, формулювання висновків).*

4. **Бородай Є. С.,** Лихолат Т. Ю., Лихолат Ю. В. Динаміка активності СОД та накопичення ТБК-активних продуктів у процесі онтогенезу деяких дерноутворюючих рослин в умовах мегаполісу. 2023 Ecology and Noospherology, 34(2), 112–116. doi: <https://doi.org/10.15421/032317>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка біологічного, матеріалу, аналітичний огляд, написання статті; Лихолат Т. Ю.: статистична обробка даних, аналіз результатів ; Лихолат Ю.В.: концепція та дизайн дослідження, формулювання висновків).*

5. Домницька І. Л., Лихолат Ю.В., Наумова Т.О., **Бородай Є.С.** Порівняння розеткових та короткостеблових видів Gesneriaceae Dumort., інтродукованих у ботанічний сад Дніпровського національного університету

імені Олеся Гончара. Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель. 2022. Том 51. С. 43-71.

DOI <https://doi.org/10.15421/442206>

<https://steppeforestry.dp.ua/index.php/vsllr/article/view/217>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка біологічного матеріалу, аналітичний огляд; Домницька І. Л.: написання статті, аналіз результатів; Наумова Т.О.: статистична обробка даних; Лихолат Ю.В. концепція та дизайн дослідження, формулювання висновків).*

6. Лихолат Ю. В., Білик І. В., **Бородай Є. С.**, Буряк І. Ю. Стійкість високодекоративних квіткових рослин за різних екологічних умов. Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель. 2015. Вип. 44. С. 72-79. http://nbuv.gov.ua/UJRN/pslis_2015_44_15

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка біологічного матеріалу, формулювання висновків, аналітичний огляд; Білик І. В.: статистична обробка даних, написання статті; Лихолат Ю.В.: концепція та дизайн дослідження, корекція протоколу відбору матеріалів,; Буряк І. Ю.: аналіз результатів).*

7. Кабар А. М., Лучка Я. О., Давидов В. Р., **Бородай Є. С.**, Сокур О. В. Активність пероксидази як показник ефективності інтродукції представників гібридогенних плодових кісточкових рослин в умовах Степового Придніпров'я. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2018. Вип. 1. <https://scireports.com.ua/uk/journals/tom-71-1-2018>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: аналіз результатів, написання статті; Лучка Я. О. збір та обробка біологічного матеріалу, аналітичний огляд; Давидов В. Р.: статистична обробка даних,; Кабар А. М.: концепція та дизайн дослідження, корекція протоколу відбору матеріалів; Сокур О.В.: формулювання висновків).*

8. Кабар А. М., Лихолат Ю. В., Лучка Я. О., Давидов В. Р., **Бородай Є. С.**, Тропанець В. Ю. Активність каталази як показник інтродукції

гібридогенних форм кісточкових в умовах Степового Придніпров'я. 2017. Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель. Том 46. С. 92-97. DOI: <https://doi.org/10.15421/441715>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: аналіз результатів, формулювання висновків; Лучка Я. О. написання статті, збір та обробка біологічного матеріалу; Давидов В. Р.: аналітичний огляд; Тропанець В. Ю.: статистична обробка даних,; Кабар А. М.: концепція та дизайн дослідження; Лихолат Ю.В.: корекція протоколу відбору матеріалів).*

9. **Бородай Є. С.**, Лихолат Ю. В., Серга О. І., Григорюк І. П., Сокур О. В.. Зміна морфометричних та фізіолого-біохімічних показників газоутворюючих трав як механізм адаптації до дії важких металів . Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. № 3. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2016_3_3. <https://scireports.com.ua/uk/journals/tom-60-3-2016>

*(особистий внесок **Бородай Є.С.**: написання статті, аналіз результатів; Серга О.І.: формулювання висновків; Сокур О. В. збір та обробка біологічного матеріалу; Григорюк І. П.: аналітичний огляд, статистична обробка даних; Лихолат Ю.В.: концепція та дизайн дослідження; корекція протоколу відбору матеріалів).*

10. Легостаєва Т. В., Григорюк І. П., Лихолат Ю. В., **Бородай Є. С.**, Трусевич Д. А., Ломига Л. Л. Біологічні особливості деяких представників родини Рутових в умовах Ботанічного саду ДНУ. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. Вип. 6. <https://scireports.com.ua/uk/journals/tom-63-6-2016>

*(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка біологічного матеріалу, аналіз результатів; Легостаєва Т. В. написання статті, формулювання висновків; Григорюк І. П.: аналітичний огляд; Трусевич Д. А.: статистична обробка даних; Лихолат Ю.В.: концепція та дизайн дослідження; Ломига Л. Л. корекція протоколу відбору матеріалів).*

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Lykholat Yu., Lykholat T., **Boroday Eu.**, Sydorova V., Burhovych M. Use of representatives of the genus *Centaurea* L. on the school educational research land plot. Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference. Florence, Italy. 2025. Pp. 204-207. URL: <https://isg-konf.com/scientific-research-integration-of-science-and-practice-for-effective-development/>

(особистий внесок Borodai Eu.: опрацювання експериментальних матеріалів, аналітичний огляд, аналіз отриманих результатів; Lykholat T.: проведення експериментального дослідження, написання статті; Burhovych M.: статистична обробка даних; Sydorova V: збір та обробка експериментальних даних; Lykholat Yu.: концепція дослідження, формулювання висновків).

12. Lykholat Y. V., **Boroday Y. S.**, Lykholat T. Y., Kvitko M. O., Lykholat O. A. Lawn-forming grasses in the conditions of an industrial city. 6. BILSEL INTERNATIONAL GORDION SCIENTIFIC RESEARCHES CONGRESS June 01-02, 2025, ANKARA/TÜRKIYE. P. 663. <https://bilselkongreleri.com/wp-content/uploads/6.-BILSEL-INTERNATIONAL-GORDION-CONGRESS-BOOK.pdf>

(особистий внесок Borodai Y. S.: опрацювання експериментальних матеріалів, написання статті; Lykholat T. Y.: проведення експериментального дослідження, аналіз отриманих результатів,; Kvitko M.O.: аналітичний огляд, статистична обробка даних; Lykholat O. A.: збір та обробка експериментальних даних; Lykholat Yu.: концепція дослідження, формулювання висновків).

13. Лихолат Ю. В., Лихолат Т. Ю., Квітко М. О., **Бородай Є. С.**, Гальченко В. М. Стан та перспективи відновлення рослинного покриву на техногенних територіях. The 31st International scientific and practical conference “Methodological aspects of education: achievements and prospects” (August 06 – 09, 2024) Rotterdam, Netherlands. International Science Group. 2024.P.21–25.URL:<https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2024/08/METHODO>

[LOGICAL-ASPECTS-OF-EDUCATION-ACHIEVEMENTS-AND-PROSPECTS.pdf](#)

(особистий внесок **Бородай Є. С.**: збір та обробка еколого-біологічного, дендрологічного матеріалу, написання статті; Квітко М. О.: аналітичний огляд, аналіз результатів; Лихолат Ю. В.: формулювання висновків; Лихолат Т. Ю.: статистична обробка даних, концепція та дизайн дослідження; Гальченко В. М.: обробка дендрологічних даних)

14. Роль інтродукованих штучних деревних насаджень степового Придніпров'я як одного з ключових елементів накопичення забруднення при експлуатації теплоелектростанцій [Електронний ресурс] / М. О. Квітко, Ю. В. Лихолат, О. А. Лихолат, О. М. Маренков, Е. О. Євтушенко, **Є. С. Бородай**, Т. Ю. Лихолат // Безпека людини у сучасних умовах : зб. доп. 16-ї Міжнар. наук.-метод. конф., 6-7 грудня 2024 р. = Human safety in modern conditions : coll. of 16th Intern. Sci. and Methodological Conf., December 6-7, 2024 / відп. за вип. Вамболь С. О. ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Електрон. текст. дані. – Харків, 2024. – С. 93-95.

URI <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/86955>

(особистий внесок **Бородай Є. С.**: оцінка фізіологічних показників життєвості та рівня адаптації інтродуцентів; Квітко М. О.: збір та обробка еколого-біологічного, дендрологічного матеріалу, написання статті, обробка експериментальних даних; Лихолат Ю. В.: формулювання висновків, концепція та дизайн дослідження; Лихолат О. А.: аналіз результатів; Маренков О. М.: інтерпретація результатів, екосистемний аналіз; Євтушенко Е. О.: аналіз флористичного складу інтродукованих рослин; Лихолат Т. Ю.: аналітичний огляд, статистична обробка даних).

15. Квітко М., Лихолат О., Лихолат Т., **Бородай Є.**, Лихолат Ю. Значення інтродукції рослин для оптимізації стану деревних екосистем Придніпровського степу України. *Новітні досягнення біотехнології* : матер. VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, Нац. авіаційний ун-т, 21–22 вересня 2023. Київ, 2023. С. 43–44. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-6407.1.18098>

(особистий внесок **Бородай Є.** : аналіз результатів; **Квітко М.**: збір та обробка еколого-біологічного, дендрологічного матеріалу, написання статті; **Лихолат О.**: аналітичний огляд, статистична обробка даних; **Лихолат Т. Ю.**: обробка дендрологічних даних; **Лихолат Ю.**: концепція та дизайн дослідження, формулювання висновків).

ДОДАТОК Б
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ, ПОДАНОЇ НА
ЗДОБУТТЯ СТУПЕНЯ ДОКТОРА ФІЛОСОФІЇ, В ОСВІТНІЙ ПРОЦЕС
ДНІПРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ
ОЛЕСЯ ГОНЧАРА

ПОГОДЖЕНО

Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара
_____ Олег МАРЕНКОВ
« ____ » _____ 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. проректора з науково-педагогічної роботи
Дніпровського національного
університету імені Олеся Гончара
_____ Наталія ГУК
_____ 2026 р.

А К Т

впровадження результатів роботи, поданої на здобуття наукового ступеня
доктора філософії Бородай Євгенії Сергіївни «Інтегрована відповідь газонних та квітково-
декоративних рослин за умов мегаполісу на фоні змін клімату» в освітній процес
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

1. «11» травня 2026 р. пр. № 12 на засіданні вченої ради біолого-екологічного факультету у складі 14 осіб заслухали повідомлення здобувача Бородай Євгенії про результати виконання наукового дослідження.

2. Стисла характеристика результатів дослідження:

Оцінка стійкості квітково-декоративних та газонних рослин на основі вивчення фізіолого-біохімічної відповіді за умов впливу антропогенного навантаження мегаполісу на фоні кліматичних змін. Вивчено здатність до акумуляції вегетативними органами досліджуваних рослин іонів важких металів. Перевірено зміни активності функціонування ферментативної антиоксидантної системи рослин, наявність біохімічних маркерів стресу, таких як МДА, вільний пролін. Досліджено відмінності вмісту фотосинтетичних пігментів у рослин як відповідь на несприятливі умови урбанізованого середовища. Згідно отриманих результатів виявлено більш стійкі види, які можуть бути рекомендованими до використання у міському озелененні.

3. Впровадження отриманих результатів та апробація даних були використані при викладанні курсу: «Оранжерейне та промислове квітництво», «Біологічні основи газоноведення», «Пришкільна навчально-дослідна ділянка та озеленення школи».

Alexeyeva, A. A., Lykholat, Y. V., Khromykh, N. O., Kovalenko, I. M., & **Boroday, E. S.** (2016). The impact of pollutants on the antioxidant protection of species of the genus *Tilia* at different developmental stages. *Visnyk of Dnipropetrovsk University, Biology, Ecology*, 24(1), 188–192. DOI: <https://doi.org/10.15421/011623> <https://ecology.dp.ua/index.php/ECO/article/view/011623>

Kulbachko Y. L., **Boroday Ye. S.**, Lykholat T. Y., Lykholat O. A., Kvitko M.O., Marenkov O. M., Yevtushenko E. O. Lykholat Y. V. Accumulation of heavy metals by different representatives of biota in the operation zone of the Prydniprovsk thermal power plant. *The Materials of the V International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2024)*, Kryvyi Rih, Ukraine, May 21–24, 2024. Sustainable Futures in a Changing World – Reflections from the 5th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2024). IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 1415.

URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1415/1/012005>

DOI [10.1088/1755-1315/1415/1/012005](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012005)

Бородай Є. С., Лихолат Ю. В. Вплив аерополітантів примігстральних територій на активність антиоксидантних ферментів вегетативних органів дерноутворюючих трав. Наукові записки .Біологічні науки(Ніжинський державний університет імені Миколи Гоголя) / за заг.ред.В.І. Шейко.– Ніжин:НДУ ім. М.Гоголя, 2025. No 3. С. 33-43.
DOI 10.31654/2786-8478-2025-BN-3-33-43

Бородай Є. С., Лихолат Т.Ю., Лихолат Ю. В. Динаміка активності СОД та накопичення ТБК-активних продуктів у процесі онтогенезу деяких дерноутворюючих рослин в умовах мегаполісу. 2023 Ecology and Noospherology, 34(2), 112–116. doi:10.15421/032317

Домницька І. Л., Лихолат Ю.В., Наумова Т.О., **Бородай Є.С.** Порівняння розеткових та короткостеблових видів Gesneriaceae Dumort., інтродукованих у ботанічний сад Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара. Питання степового лісознавства та лісової рекультивациі земель. 2022. Том 51. С. 43-71.

DOI <https://doi.org/10.15421/442206>

<https://steppeforestry.dp.ua/index.php/vsllr/article/view/217>

Лихолат Ю. В., Білик І. В., **Бородай Є. С.,** Буряк І. Ю. Стійкість високодекоративних квіткових рослин за різних екологічних умов. Питання степового лісознавства та лісової рекультивациі земель. 2015. Вип. 44. С. 72-79.

Кабар А. М., Лучка Я. О., Давидов В. Р., **Бородай Є. С.,** Сокур О. В. Активність пероксидази як показник ефективності інтродукції представників гібридогенних плодових кісточкових рослин в умовах Степового Придніпров'я. Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2018. Вип. 1.

Кабар А. М., Лихолат Ю. В., Лучка Я. О., Давидов В. Р., **Бородай Є. С.,** Тропанець В. Ю. Активність каталази як показник інтродукції гібридогенних форм кісточкових в умовах степового придніпров'я 2017 Питання степового лісознавства та лісової рекультивациі земель. Том 46. С. 92-97.

Бородай Є. С., Лихолат Ю. В., Серга О. І., Григорюк І. П., Сокур О. В.. Зміна морфометричних та фізіолого-біохімічних показників газонутворюючих трав як механізм адаптації до дії важких металів // Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. - 2016. - № 3. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nd_2016_3_3.

Легостаєва Т. В., Григорюк І. П., Лихолат Ю. В., **Бородай Є. С.,** Трусевич Д. А., Ломига Л. Л. Біологічні особливості деяких представників родини Рутових в умовах Ботанічного саду ДНУ Наукові доповіді Національного університету біоресурсів і природокористування України. 2016. Вип. 6.

Lykholat Yu., Lykholat T., **Boroday Eu.,** Sydorova V., Burhovych M. Use of representatives of the genus *Centaurea* L. on the school educational research land plot. Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference. Florence, Italy. 2025. Pp. 204-207. URL: <https://isg-konf.com/scientific-research-integration-of-science-and-practice-for-effective-development/>

Lykholat Y. V., **Boroday Y. S.,** Lykholat T. Y., Kvitko M. O., Lykholat O. A. Lawn-forming grasses in the conditions of an industrial city. 6. BILSEL INTERNATIONAL GORDION SCIENTIFIC RESEARCHES CONGRESS June 01-02, 2025, ANKARA/TÜRKIYE. P. 663. <https://bilselkongreleri.com/wp-content/uploads/6.-BILSEL-INTERNATIONAL-GORDION-CONGRESS-BOOK.pdf>

Лихолат Ю. В., Лихолат Т. Ю., Квітко М. О., **Бородай Є. С.,** Гальченко В. М. Стан та перспективи відновлення рослинного покриву на техногенних територіях. The 31st International scientific and practical conference “Methodological aspects of education: achievements and

prospects” (August 06 – 09, 2024) Rotterdam, Netherlands. International Science Group. 2024. P. 21–25. URL: https://isg-konf.com/wp-content/uploads/2024/08/METHODO_LOGICAL-ASPECTS-OF-EDUCATION-ACHIEVEMENTS-AND-PROSPECTS.pdf

Роль інтродукованих штучних деревних насаджень степового Придніпров'я як одного з ключових елементів накопичення забруднення при експлуатації теплоелектростанцій [Електронний ресурс] / М. О. Квітко, Ю. В. Лихолат, О. А. Лихолат, О. М. Маренков, Е. О. Євтушенко, **Є. С. Бородай**, Т. Ю. Лихолат // Безпека людини у сучасних умовах : зб. доп. 16-ї Міжнар. наук.-метод. конф., 6-7 грудня 2024 р. = Human safety in modern conditions : coll. of 16th Intern. Sci. and Methodological Conf., December 6-7, 2024 / відп. за вип. Вамболь С. О. ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Електрон. текст. дані. – Харків, 2024. – С. 93-95. URI <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/86955>

Квітко М., Лихолат О., Лихолат Т., **Бородай Є.**, Лихолат Ю. Значення інтродукції рослин для оптимізації стану деревних екосистем Придніпровського степу України. *Новітні досягнення біотехнології* : матер. VII Міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, Нац. авіаційний ун-т, 21–22 вересня 2023. Київ, 2023. С. 43–44. DOI: <https://doi.org/10.18372/2306-6407.1.18098>

4. Пропозиції ради:

Запропоновано впровадити результати дисертаційної роботи Бородай Євгенії «Інтегрована відповідь газонних та квітково-декоративних рослин за умови мегаполісу на фоні змін клімату».

Голова вченої ради біолого-екологічного факультету,
д.б.н., професор

Олена СЕВЕРИНОВСЬКА

ДОДАТОК В
АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ, ПОДАНОЇ НА
ЗДОБУТТЯ СТУПЕНЯ ДОКТОРА ФІЛОСОФІЇ, В ВИРОБНИИЧИЙ
ПРОЦЕС БОТАНІЧНОГО САДУ ДНІПРОВСЬКОГО
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ ОЛЕСЯ ГОНЧАРА

АКТ

впровадження результатів роботи, поданої на здобуття ступеня доктора філософії Бородай Є. С. «Інтегрована відповідь газонних та квітково-декоративних рослин за умови мегаполісу на фоні змін клімату» в виробничий процес Ботанічного саду Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

На основі виявлених молекулярно-біохімічних механізмів толерантності та високої стабільності пігментного комплексу багаторічників *Chrysanthemum × koreanum*, *Iris hybrida* та *Aster dumosum* у виробничий процес відділу квітникарства та відділу тропічних і субтропічних рослин впроваджено рекомендації щодо їх пріоритетного розмноження та використання. Данні види рекомендовано як базовий асортимент для створення кліматично оптимізованих ландшафтних композицій, рабток та міксбордерів в умовах антропогенного навантаження, хвиль спеки та хронічного пилового забруднення.

У практику впроваджено методику експрес-оцінювання техногенного навантаження за допомогою використання лабільних рослинних тест-систем, зокрема однорічників *Tagetes erecta*, *Calendula officinalis* та *Petunia × hybrida*. Зафіксована у роботі пряма кореляція між рівнем ксенобіотичного навантаження, деструкцією світлозбиральних комплексів хлорофілу та виснаженням антиоксидантної ферментативної системи дозволяє використовувати ці види для раннього виявлення екологічного стресу на території Ботанічного саду.

Директор Ботанічного саду
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара,
канд. біол. наук, доц.



Анатолій КАБАР

Проректор з наукової роботи
Дніпровського національного університету
імені Олеся Гончара



Олег МАРЕНКОВ