

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова робота
на правах рукопису

СТРЕПЕТОВА ХРИСТИНА ВЯЧЕСЛАВІВНА

УДК 581.524:712.253:551.58

ДИСЕРТАЦІЯ
ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ІНТРОДУКОВАНОЇ ДЕНДРОФЛОРИ НА
МІКРОКЛІМАТИЧНІ ПАРАМЕТРИ ЗЕЛЕНИХ МІСЬКИХ ЗОН

Спеціальність – 101 Екологія
Галузь знань – 10 Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)

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

_____Христина СТРЕПЕТОВА

Науковий керівник: Голобородько Кирило Костянтинович, доктор біологічних наук,
професор

Дніпро - 2026

АНОТАЦІЯ

Стрепетова Х.В. **Особливості впливу інтродукованої дендрофлори на мікрокліматичні параметри зелених міських зон** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 – Екологія. – Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, 2026.

Дисертаційна робота присвячена комплексному дослідженню впливу інтродукованої дендрофлори на формування та регуляцію мікрокліматичних параметрів зелених міських зон в умовах інтенсивної антропогенної трансформації середовища. Актуальність дослідження зумовлена зростанням ролі природоорієнтованих рішень у забезпеченні сталого розвитку міст, особливо в умовах посилення кліматичних змін, підвищення температурного навантаження, деградації міських екосистем і зростання проявів ефекту міського теплового острова.

Метою дослідження було встановлення закономірностей і механізмів впливу інтродукованих деревних видів на температурно-вологісний режим повітря та ґрунту, а також визначення їх екологічної ролі у формуванні локального мікроклімату міських екосистем. Дослідження проведено в межах зелених насаджень міста Дніпро (зокрема парк ім. Т. Шевченка та прилеглі урбанізовані території) протягом вегетаційного періоду. Польові дослідження включали систематичні вимірювання температури повітря, відносної вологості повітря, температури та вологості ґрунту у підкроновому просторі дерев з урахуванням добової та сезонної динаміки, особливостей архітекtonіки крони, її експозиції та просторової диференціації.

Паралельно здійснювали оцінювання фізіологічного стану рослин шляхом визначення показників водного статусу листків, зокрема відносного вмісту води (RWC), водного дефіциту (WD) та загального вмісту води (WC), що дозволило встановити взаємозв'язки між функціональним станом рослин і процесами мікрокліматичної регуляції. Статистичну обробку експериментальних даних виконано із застосуванням сучасних методів математичної статистики, зокрема

дисперсійного аналізу (ANOVA), багатовимірний дисперсійний аналіз (MANOVA) та пост-хок тесту Тьюкі (Tukey HSD), що дало змогу оцінити як окремі ефекти факторів, так і їх взаємодії та встановити статистично значущі відмінності ($p < 0,05$).

У результаті дослідження встановлено, що інтродуковані деревні види відіграють суттєву роль у формуванні мікрокліматичних умов зелених міських зон. Виявлено стабільне статистично значуще зниження температури повітря і ґрунту та підвищення відносної вологості у підкроновому просторі порівняно з відкритими ділянками. Встановлено виражені видоспецифічні відмінності у здатності інтродуцентів модифікувати мікроклімат, що пов'язано з морфологічними особливостями крони, щільністю листового покриву, інтенсивністю транспірації та структурою листового апарату. Доведено, що просторові чинники (експозиція та вертикальна стратифікація в межах крони) істотно впливають на варіабельність і розподіл мікрокліматичних показників.

Отримані результати суттєво розширюють наукові уявлення про екологічні функції інтродукованої дендрофлори в урбанізованому середовищі. Практичне значення дослідження полягає у створенні наукового підґрунтя для оптимізації підбору деревних видів у системі міського озеленення, підвищення адаптивного потенціалу міських екосистем до кліматичних змін, зменшення проявів ефекту міського теплового острова та покращення екологічної комфортності урбанізованих територій.

Ключові слова: мікроклімат, урбанізовані ґрунти, штучні насадження, середовищеві роль, буферність, водний дефіцит, органічний опад, міські ґрунти, міський зелений простір, міський парк, мегаполіс, урбанозем, біотичний потенціал міських ґрунтів, умови росту лісу, показники водообміну, інтродукована рослинність, випаровування води листям, лісові умови, вміст води, вологоутримуюча здатність, всмоктувальна сила листя, степова зона України, типи рослинності, стале управління земельними ресурсами, лісові умови, біорізноманіття, управління ландшафтами, фітоіндикація, таксономічний склад, фіторекультивация, ґрунтозахисні технології, вирощування сільськогосподарських культур, інвазійні види, робінія звичайна,

адаптивний потенціал, екологічна, характеристика популяції, умови експансії, послуги з догляду за деревами та чагарниками, міські ландшафти, декоративність, проективне покриття, тепловий острів, міська екосистема, парки-пам'ятки садово-паркового мистецтва, екосистемні послуги, трансформація, трофотоп, гігротоп, морфометричні показники, забруднення, біоінвазія, поширення, інвазійні види.

ABSTRACT

Strepetova Kh.V. Specific Features of the Influence of Introduced Dendroflora on Microclimatic Parameters of Urban Green Spaces. — Qualification scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Specialty 101 – Ecology. – Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, 2026.

The dissertation provides a comprehensive assessment of the influence of introduced dendroflora on the formation and regulation of microclimatic parameters within urban green spaces under intensive anthropogenic transformation. The relevance of the study stems from the increasing importance of nature-based solutions for mitigating climate change impacts in cities, particularly regarding thermal stress, degradation of urban ecosystems, and the intensification of the urban heat island effect.

The research aimed to identify the regularities and mechanisms by which introduced tree species influence the temperature and humidity regimes of air and soil, as well as to determine their ecological role in shaping local urban microclimates. The study was conducted in urban green areas of Dnipro (specifically Taras Shevchenko Park and adjacent territories) throughout the growing season. Field observations involved systematic measurements of air temperature, relative humidity, and soil temperature and moisture within the under-canopy space, accounting for diurnal and seasonal variability, canopy architecture, exposure, and spatial heterogeneity.

Furthermore, the physiological status of the plants was evaluated through leaf water relations analysis, including relative water content (RWC), water deficit (WD), and total water content (WC). This approach allowed for the correlation of plant functional responses with microclimatic regulation processes. Statistical analysis employed advanced methods, including analysis of variance (ANOVA), multivariate analysis of variance (MANOVA), and Tukey's post hoc test (Tukey HSD), ensuring the identification of statistically significant differences ($p < 0.05$) and interactions between environmental and biological factors.

The results indicate that introduced tree species significantly modify microclimatic conditions in urban green spaces. A consistent, statistically significant reduction in air and soil temperature, alongside an increase in relative humidity under tree canopies, was observed compared to open areas. The magnitude of these effects varies based on species-specific traits, such as canopy density, leaf morphology, and transpiration capacity, highlighting unequal efficiencies among introduced species in regulating microclimate.

Moreover, spatial factors—specifically canopy exposure and vertical stratification—were found to significantly influence the distribution of microclimatic indicators. The study demonstrates a strong link between plant physiological parameters and microclimatic conditions, confirming the integrative role of vegetation in urban climate regulation. From a practical standpoint, these findings establish a scientific framework for optimizing species selection in urban greening projects. The results contribute to enhancing the adaptive capacity of urban ecosystems to climate change, mitigating the urban heat island effect, and improving environmental comfort for urban populations.

Keywords: microclimate, urban soils, artificial plantations, environment-forming role, buffer capacity, water deficit, organic litter, urban green space, urban park, megapolis, urbanozem, biotic potential of urban soils, forest growth conditions, water exchange indicators, introduced vegetation, leaf transpiration, forest site conditions, water content, water-holding capacity, leaf suction force, steppe zone of Ukraine, vegetation types, sustainable land management, biodiversity, landscape management, phytoindication, taxonomic composition, phytorecultivation, soil protection technologies, cultivation of agricultural crops, invasive species, *Robinia pseudoacacia*, adaptive potential, population characteristics, expansion conditions, tree and shrub maintenance services, urban landscapes, ornamental value, projective cover, urban heat island, urban ecosystem, parks-monuments of landscape gardening art, ecosystem services, transformation, trophotope, hygrotape, morphometric indicators, pollution, bioinvasion, distribution.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science:

1. Didur O. O., Katsevych V. V., Ivanko I. A., Loza I. M., **Strepetova Kh. V.**, Holoborodko K. K., Lovynska V. M., Sytnyk S. A. (2024). *The influence of introduced tree species on the relationships between soil buffering capacity and ecological groups of microorganisms in urban park soils*. **Biosystems Diversity**, 32(4), 512–517. (Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті).
2. Strepetova, H. V., Katsevich, V. V., Ivanko, I. A., Loza, I. M., Zhukov, O. V., Holodok, L. P., Holoborodko, K. K. (2025). Microclimatic influence and water state characteristics of introduced tree species in urban park stands. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, 16(4), e25216. (Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті).

Статті в наукових фахових виданнях України

3. Кацевич В. В., **Стрепетова Х. В.**, Голобородько К. К., Ловинська В. М., Ситник С. А., Ніковська І. К., Петрушина Г. О. (2024). Особливості впливу інтродукованих видів деревних рослин на ферментативну активність урбанізованих ґрунтів у парку ім. Т. Г. Шевченка (м. Дніпро). **Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель**, 53, 32–43. (Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті).
4. Didur O., **Strepetova K.**, Katsevych V., Holoborodko K., Ivanko I., Loza I., Lovynska V., Sytnyk S. (2023). *Environmental quality assessment of soil as a component of green spaces in parks of the megalopolis*. **Agrology**, 6(4), 92–96. (Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті).
5. Дідур О. О., Іванько І. А., Голобородько К. К., Кацевич В. В.,

Стрепетова Х. В., Грицан Ю. І. (2023). Оцінка буферної здатності ґрунтів зелених насаджень парків мегаполісу. **Питання степового лісознавства та лісової рекультивації земель**, 52, 32–41. (*Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті*).

6. Katsevych V. V., **Strepetova Kh. V.** (2023). *Features of the granulometric composition of soils under introduced deciduous and ornamental woody plants in Taras Shevchenko Park. Ecology and Noospherology*, 34(2), 108–111. (*Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті*)

Тези наукових доповідей:

7. **Стрепетова Х. В.** Особливості впливу міських зелених зон на процеси вологообігу в міському середовищі / Х. В. Стрепетова, К. К. Голобородько // Вода для миру: Матеріали регіональної науково-практичної конференції, присвяченої Всесвітньому дню води (Дніпро 22 березня 2024 р.). - Дніпро: ДДАЕУ, 2024. - С. 93 – 94. - Режим доступу : [URI \(Уніфікований ідентифікатор ресурсу\): https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10016](https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10016). (*Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті*).

8. Ткачук А. В. Забезпеченість природного зволоження території, як чинник розвитку аграрного виробництва в степу України / Андрій Васильович Ткачук, Тетяна Іванівна Ткачук, **Х. В. Стрепетова** // Підземні води як стратегічний ресурс економічного розвитку держави: Матеріали Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції, присвяченої Всесвітньому дню 22 березня 2022 р. – Київ: Інститут водних проблем і меліорації НААН, 2022. – С. 88 - 89. – Режим доступу: [URI \(Уніфікований ідентифікатор ресурсу\): https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/9410](https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/9410). (*Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті*).

9. **Стрепетова Х. В.** Особливості гранулометричного складу ґрунтів під інтродукованими листяно-декоративними деревними рослинами в парку ім. Т.Г. Шевченка / **Х. В. Стрепетова**, К. К. Голобородько // Галузеві проблеми екологічної

безпеки – 2024: Міжнародна науково-практична конференція за участю молодих науковців (24 жовтня 2024, Харків). – Харків. – 2024. – С. 139 – 141. – Режим доступу: URI (Уніфікований ідентифікатор ресурсу): <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/12990>. *(Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті).*

10. Оцінка екологічної якості ґрунтів як компонента зелених насаджень парків мегаполісу / О. О. Дідур, **Х. В. Стрепетова**, В. В. Кацевич, В. М. Ловинська, А. М. Сабанський // Рослини та урбанізація: матеріали XIII Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро 1 лютого 2024 р.). - Дніпро, 2024. - С. 16 – 17. – Режим доступу: URI (Уніфікований ідентифікатор ресурсу): <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10017>. *(Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті).*

11. Буферна здатність ґрунтів як індикатор стану стійкості ґрунтів зеленої інфраструктури до деградації (м. Дніпро) / **Х. В. Стрепетова**, О. О. Дідур, В. В. Кацевич, К. К. Голобородько // Наукові основи збереження біотичної, різноманітності: Матеріали V (XVI) Міжнародної наукової конференції молодих учених (Львів, 18-19 жовтня 2023 р.). - Львів, 2023. - С. 45 - 47. – Режим доступу: URI (Уніфікований ідентифікатор ресурсу): <https://dspace.dsau.dp.ua/handle/123456789/10018>. *(Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка та написання статті).*

ЗМІСТ

	ВСТУП	11
1	МІСЬКА ЗЕЛЕНА ІНФРАСТРУКТУРА	19
1.1	Функції зелених насаджень у місті	19
1.2	Роль міських зелених насаджень у формуванні мікроклімату та адаптації міст до змін клімату	30
1.3	Екологічні особливості інтродукції нових видів дерев у міських зелених зонах	39
1.4	Методичні підходи до дослідження впливу зелених насаджень на мікроклімат міських територій	47
1.5	Роль інтродукованої дендрофлори у формуванні мікроклімату міських зелених зон	54
2	ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ	61
2.1	Географічне положення та особливості рельєфу	60
2.2	Геоекологічні типи місцевості м. Дніпра	64
2.3	Характеристика кліматичних умов	67
2.4	Гідрологічні умови	68
2.5	Міські ґрунти	69
2.6	Міська флора і фауна	70
3	МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ	72
3.1	Методи польових досліджень	72
3.2	Методи лабораторних досліджень	74
3.3	Методи статистичної обробки даних	75
4	ВПЛИВ ВИДОВОЇ НАЛЕЖНОСТІ, ЕКСПОЗИЦІЇ КРОНИ ТА ПОЛОЖЕННЯ КРОНИ НА МІКРОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ	79
4.1	Формування температурного режиму ґрунту в підкрановому просторі	82
4.2	Формування режиму вологості ґрунту в підкрановому просторі	85
4.3	Формування температурного режиму приземного шару повітря	87
4.4	Формування вологості повітря в підкрановому просторі	89
4.5	Узагальнення впливу факторів на мікрокліматичні параметри	91
5	МІКРОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ ТА ВОДНИЙ СТАТУС ЛИСТКІВ ДЕРЕВНИХ ВИДІВ У МІСЬКИХ ПАРКОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ	121
5.1	Просторово-часова мінливість мікрокліматичних параметрів у насадженнях досліджуваних видів	121
5.2	Міжвидові особливості та динаміка індексів водного статусу листків	123
5.3	Вплив мікрокліматичних факторів на показники водного статусу листків за результатами моделей зі змішаними ефектами	125
	ВИСНОВКИ	133
	СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	135
	ДОДАТКИ	145

ВСТУП

Актуальність дослідження зумовлена зростанням ролі зеленої інфраструктури у забезпеченні сталого розвитку урбанізованих територій в умовах інтенсивної урбанізації та глобальних кліматичних змін. У сучасних умовах міста виступають складними соціо-екологічними системами, в яких відбувається суттєва трансформація природних процесів під впливом антропогенних факторів. Це проявляється у порушенні теплового та водного балансу, зміні газового складу атмосфери, зростанні температурного навантаження та формуванні локальних кліматичних аномалій, зокрема ефекту міського теплового острова.

Урбанізовані території характеризуються високою щільністю забудови, значною часткою штучних поверхонь, зниженням площ природної рослинності та обмеженою циркуляцією повітря, що призводить до накопичення тепла та погіршення мікрокліматичних умов. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває впровадження природоорієнтованих рішень, серед яких провідну роль відіграє зелена інфраструктура як ефективний інструмент регуляції мікроклімату та підвищення екологічної стійкості міських екосистем.

Інтродуковані види дендрофлори є важливою складовою міських зелених насаджень і широко використовуються в озелененні міст завдяки їх декоративним, екологічним та адаптивним властивостям. Вони формують значну частину зеленого каркасу міста та відіграють суттєву роль у регуляції мікрокліматичних параметрів урбанізованого середовища, зокрема температурного режиму, вологості повітря та ґрунту, а також у зменшенні негативних проявів ефекту міського теплового острова. Завдяки процесам транспірації, затінення та зміни радіаційного балансу деревна рослинність здатна формувати локальні мікрокліматичні умови, що відрізняються від відкритих урбанізованих ділянок.

Водночас ефективність інтродукованих видів у формуванні мікроклімату значною мірою визначається їх морфофізіологічними характеристиками, такими як площа листової поверхні, структура та щільність крони, інтенсивність транспірації,

а також здатність підтримувати водний баланс у стресових умовах міського середовища. Це зумовлює необхідність їх комплексного дослідження з урахуванням як біологічних особливостей, так і умов зростання.

В умовах підвищеного антропогенного навантаження, характерного для великих промислових центрів, таких як м. Дніпро, зелені насадження виступають одним із ключових природоорієнтованих механізмів формування сприятливого мікроклімату та підвищення екологічної комфортності середовища проживання населення. Специфічні умови міського середовища, зокрема ущільнена забудова, деградація ґрунтів, змінений водний режим, забруднення повітря і ґрунтів, а також підвищені температурні навантаження, істотно впливають на функціонування деревних рослин, особливо інтродукованих видів, змінюючи їх фізіологічний стан і здатність до регуляції мікроклімату.

Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених ролі зелених насаджень у міських екосистемах, питання видоспецифічного впливу інтродукованої дендрофлори на формування локальних мікрокліматичних умов залишаються недостатньо вивченими, особливо для умов степової зони України. Більшість існуючих досліджень має узагальнений характер і не враховує комплексної взаємодії морфофункціональних характеристик дерев, просторової структури їх крон та фізіологічного стану з параметрами мікроклімату.

Потребує уточнення взаємозв'язок між біологічними особливостями деревних видів, просторовою структурою їх крон та параметрами підкоронового мікроклімату, а також їх роль у регуляції водного статусу рослин у міських умовах. Особливу актуальність має оцінка водного статусу як інтегрального показника адаптації рослин до умов урбанізованого середовища та фактора, що визначає ефективність їх мікрокліматорегулювальних функцій.

Крім того, актуальним є застосування сучасних методів польових і лабораторних досліджень, а також статистичного аналізу (зокрема багатовимірних методів), що дозволяють комплексно оцінити вплив різних факторів (вид, експозиція, положення крони) на мікрокліматичні параметри, встановити їх взаємодію та виявити закономірності формування підкоронового мікроклімату.

Таким чином, необхідність поглибленого вивчення особливостей впливу інтродукованих видів дерев на мікрокліматичні параметри зелених міських зон, а також їх адаптаційного потенціалу в умовах урбанізованого середовища визначає актуальність даного дослідження, його наукову новизну та практичну значущість.

Мета дослідження полягає у комплексному з'ясуванні особливостей впливу інтродукованої дендрофлори на формування мікрокліматичних параметрів зелених міських зон, зокрема температурного та вологісного режимів ґрунту і приземного шару повітря, а також у визначенні ролі видоспецифічних, морфологічних і функціональних характеристик дерев у регуляції мікроклімату в умовах урбанізованого середовища.

Досягнення поставленої мети передбачає дослідження закономірностей формування підкоронового мікроклімату як результату взаємодії біологічних властивостей інтродукованих видів дерев із абіотичними чинниками міського середовища. Особлива увага приділяється аналізу впливу просторової структури крони, її щільності, архітектоніки та експозиції на формування температурно-вологісного режиму в підкороновому просторі.

Дослідження спрямоване на встановлення закономірностей формування підкоронового мікроклімату залежно від видової належності інтродукованих дерев, просторової структури їх крон і сезонної динаміки метеорологічних факторів. Важливим аспектом є оцінка варіабельності мікрокліматичних показників у межах різних просторових зон крони та виявлення факторів, що визначають їх зміну.

Крім того, дослідження передбачає оцінку взаємозв'язку між мікрокліматичними умовами та водним статусом листків як інтегральним показником фізіологічного стану рослин і їх адаптації до умов урбанізованого середовища. Встановлення таких взаємозв'язків дозволяє розкрити механізми функціонування інтродукованих видів у змінених екологічних умовах та оцінити їх здатність до ефективної регуляції мікроклімату.

Отримані результати мають сприяти поглибленню наукових уявлень про екологічну роль інтродукованих видів дендрофлори у функціонуванні міських екосистем, розширенню теоретичних основ мікрокліматорегулювальної функції

зелених насаджень, а також можуть бути використані для наукового обґрунтування підходів до оптимізації структури зелених насаджень і підвищення ефективності зеленої інфраструктури міст в умовах кліматичних змін.

Завдання дослідження:

- з'ясувати особливості впливу інтродукованої дендрофлори на мікрокліматичні параметри ґрунту (температура та вологість) паркової екосистеми;
- з'ясувати особливості інтродукованої дендрофлори на мікрокліматичні параметри приземного шару повітря (температура та вологість) паркової екосистеми;
- проаналізувати сезонну динаміку мікрокліматичних параметрів ґрунту та приземного шару повітря під кронами різних видів інтродукованих видів дерев;
- встановити особливості параметрів вмісту води в листках різних інтродукованих видів дерев у міських паркових екосистемах;
- проаналізувати особливості параметрів відносного вмісту води в листках різних інтродукованих видів дерев у міських паркових екосистемах.

Об'єкт дослідження – зелені насадження міських паркових екосистем, сформовані інтродукованими видами дендрофлори в умовах урбанізованого середовища.

Предмет дослідження – мікрокліматичні параметри (температура та вологість ґрунту і приземного шару повітря) під кронами інтродукованих видів дерев, а також водний статус листків як показник адаптації рослин до умов міського середовища.

Методи дослідження - у роботі використано комплекс польових, лабораторних і статистичних методів досліджень. Польові дослідження включали вимірювання мікрокліматичних параметрів (температури та відносної вологості повітря, температури і вологості ґрунту) під кронами дерев із використанням сучасних вимірювальних приладів, а також відбір листового матеріалу для оцінки водного статусу рослин.

Лабораторні дослідження передбачали визначення показників водного стану листків, зокрема відносного вмісту води (RWC) та водного дефіциту (WD), із застосуванням класичних фізіологічних методів.

Для обробки отриманих даних використано методи математичної статистики: описову статистику, дисперсійний аналіз (ANOVA, MANOVA), множинні порівняння середніх значень (критерій Тьюкі), а також кореляційний аналіз для встановлення взаємозв'язків між досліджуваними показниками.

Комплексне застосування зазначених методів забезпечило об'єктивність оцінки впливу інтродукованої дендрофлори на формування мікрокліматичних умов міських екосистем.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у встановленні закономірностей формування мікрокліматичних умов у зелених міських зонах під впливом інтродукованих видів дендрофлори в умовах урбанізованого середовища степової зони України.

Уперше:

- комплексно оцінено вплив інтродукованих видів дерев на мікрокліматичні параметри ґрунту та приземного шару повітря (температуру і вологість) у міських паркових екосистемах;

- встановлено видоспецифічні особливості формування підкоронового мікроклімату залежно від морфологічних характеристик крони, її експозиції та просторового положення;

- виявлено закономірності сезонної динаміки мікрокліматичних параметрів під кронами інтродукованих видів дерев у межах вегетаційного періоду;

- доведено взаємозв'язок між мікрокліматичними умовами під кронами дерев і показниками водного статусу листків (відносним вмістом води та водним дефіцитом) як індикаторами адаптації рослин до урбанізованого середовища.

Удосконалено:

- підходи до комплексної оцінки мікрокліматорегулювальної ролі інтродукованої дендрофлори в умовах міських екосистем із використанням сучасних методів польових вимірювань і багатовимірного статистичного аналізу;

- наукові уявлення про роль просторової структури крони та видових особливостей дерев у формуванні температурно-вологісного режиму підкоронового простору.

Набули подальшого розвитку:

- теоретичні положення щодо функціонування міської зеленої інфраструктури як чинника регуляції мікроклімату в умовах кліматичних змін;
- наукові підходи до оцінки адаптаційного потенціалу інтродукованих видів дерев у міських екосистемах.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості використання отриманих наукових результатів для підвищення ефективності функціонування міської зеленої інфраструктури та оптимізації складу і структури зелених насаджень у містах степової зони України.

Встановлені закономірності впливу інтродукованих видів дерев на мікрокліматичні параметри дозволяють обґрунтовано підходити до добору видового складу насаджень з урахуванням їх здатності регулювати температурний і вологісний режим міського середовища, зменшувати прояви теплового стресу та формувати комфортні умови для населення.

Отримані результати можуть бути використані:

- у практиці міського озеленення при проектуванні та реконструкції паркових і рекреаційних територій;
- у системі управління зеленою інфраструктурою міст для підвищення її екологічної ефективності та адаптації до змін клімату;
- для оцінки екологічного стану міських насаджень і прогнозування їх функціонування в умовах зростаючого антропогенного навантаження;
- у розробці рекомендацій щодо раціонального використання інтродукованих видів дендрофлори в урбанізованому середовищі.

Крім того, результати дослідження можуть бути використані в освітньому процесі закладів вищої освіти при викладанні дисциплін екологічного, біологічного та ландшафтно-екологічного спрямування, а також у подальших наукових

дослідженнях, пов'язаних із функціонуванням міських екосистем і впливом зелених насаджень на мікроклімат.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є самостійно виконаним науковим дослідженням. Здобувачем особисто сформульовано мету та завдання дослідження, обґрунтовано його актуальність, здійснено аналіз наукової літератури за темою роботи та визначено основні напрями досліджень.

Автором самостійно проведено польові дослідження, включаючи вибір дослідних ділянок, відбір об'єктів дослідження, вимірювання мікрокліматичних параметрів (температури та вологості повітря і ґрунту), а також відбір рослинного матеріалу. Лабораторні дослідження з визначення показників водного статусу листків (зокрема відносного вмісту води та водного дефіциту) виконано здобувачем особисто.

Обробку експериментальних даних, їх статистичний аналіз (у тому числі з використанням методів ANOVA та MANOVA), інтерпретацію результатів, формулювання наукових положень, висновків і практичних рекомендацій здійснено здобувачем самостійно.

Польові та лабораторні дослідження, математико-статистичну обробку отриманих даних, а також їх узагальнення й інтерпретацію результатів виконано здобувачем самостійно або за його безпосередньої участі у співпраці з працівниками Дніпровського державного аграрно-економічного університету (ДДАЕУ).

Апробація результатів дисертації.

Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідалися та обговорювалися на наукових конференціях різного рівня, зокрема на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях: «Підземні води як стратегічний ресурс економічного розвитку держави» (Київ, 2022), «Наукові основи збереження біотичної різноманітності» (Львів, 2023), «Рослини та урбанізація» (Дніпро, 2024), «Вода для миру» (Дніпро, 2024), «Галузеві проблеми екологічної безпеки» (Харків, 2024).

У процесі апробації отримані результати були обговорені на наукових форумах, що дозволило уточнити окремі положення дослідження, підтвердити їх наукову обґрунтованість та практичну значущість.

Публікації.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 11 наукових праць, у тому числі 2 статті у наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus та Web of Science, 4 статті у фахових наукових виданнях України та 5 тез доповідей у матеріалах наукових конференцій.

У наукових публікаціях відображено основні результати дослідження, зокрема питання впливу інтродукованих видів дерев на екологічний стан ґрунтів і мікрокліматичні параметри міських зелених насаджень, а також особливості функціонування зелених екосистем урбанізованого середовища.

Структура дисертації. Загальний обсяг дисертаційної роботи – 149 сторінок, зокрема основного тексту – 135. Робота ілюстрована 8 таблицями, 18 рисунками і складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 145 найменувань та 5 додатків.

1 МІСЬКА ЗЕЛЕНА ІНФРАСТРУКТУРА

1.1 Функції зелених насаджень у місті

Зелені насадження є ключовим компонентом міської зеленої інфраструктури та виконують комплекс екологічних, соціальних і економічних функцій у структурі урбанізованих ландшафтів. У сучасних умовах урбанізації вони розглядаються як важливий елемент забезпечення сталого розвитку міст, оскільки сприяють підтриманню екологічної рівноваги, формуванню сприятливих мікрокліматичних умов і підвищенню якості життя населення [1; 2]. Їх значення зростає в умовах посилення антропогенного навантаження, коли природні компоненти міського середовища зазнають трансформації, а потреба у стабілізації екологічних процесів стає особливо актуальною.

Зелені насадження виконують важливу роль у регуляції теплового та водного режимів міських територій, сприяючи зниженню температури повітря, підвищенню відносної вологості та зменшенню негативних проявів ефекту міського теплового острова. Завдяки процесам транспірації, затінення та зміни радіаційного балансу вони формують локальні мікрокліматичні умови, що відрізняються від відкритих урбанізованих ділянок, забезпечуючи більш комфортне середовище для населення.

У науковій літературі підкреслюється, що зелені насадження виступають складовою природного каркасу міста, забезпечуючи інтеграцію природних і антропогенних компонентів у межах урбанізованого середовища [3]. Вони формують просторову структуру міських екосистем, виступають екологічними коридорами для міграції видів, а також забезпечують підтримання біорізноманіття в умовах урбанізації. Крім того, зелені насадження відіграють важливу роль у стабілізації ґрунтового покриву, зменшенні ерозійних процесів та регуляції поверхневого стоку. Таким чином, зелені насадження не лише виконують окремі екосистемні функції, але й забезпечують комплексний вплив на функціонування міських екосистем, сприяючи їх екологічній стійкості, адаптації до кліматичних змін та формуванню сприятливого середовища для життєдіяльності людини.

Однією з провідних функцій зелених насаджень у місті є екологічна функція, яка полягає у підтриманні екосистемних процесів, збереженні біорізноманіття та стабілізації природних циклів у межах урбанізованих територій. У структурі міських екосистем рослинність виконує роль ключового біотичного компонента, що забезпечує функціонування кругообігу речовин і енергії, сприяє формуванню стійких екологічних зв'язків і підвищує загальну екологічну стійкість урбанізованого середовища.

За даними досліджень, зелені насадження забезпечують регуляцію газового складу атмосфери шляхом поглинання вуглекислого газу в процесі фотосинтезу, виділення кисню та акумулювання забруднювальних речовин [4; 5]. Вони відіграють важливу роль у зменшенні концентрації парникових газів та пом'якшенні наслідків кліматичних змін на локальному рівні. Крім того, рослинність здатна поглинати та акумулювати різні токсичні сполуки, включаючи важкі метали та органічні забруднювачі, що сприяє очищенню атмосферного повітря.

Листкова поверхня дерев і чагарників, завдяки своїй морфологічній структурі, здатна ефективно затримувати пилові частинки, аерозолі та дрібнодисперсні забруднювачі, що сприяє покращенню якості атмосферного повітря в містах [6]. Шорсткість поверхні листків, наявність воскового нальоту та складна архітектура крони підвищують ефективність осадження частинок і їх подальше видалення з атмосфери під час опадів.

Водночас рослинність виконує функцію біофільтра, знижуючи концентрацію оксидів азоту, сірки та інших шкідливих сполук [7]. Біохімічні процеси, що відбуваються в рослинах, сприяють трансформації та нейтралізації забруднювальних речовин, що зменшує їх токсичний вплив на навколишнє середовище та здоров'я населення. У результаті формується більш безпечне та екологічно збалансоване середовище в межах міських територій.

Крім того, зелені насадження сприяють збереженню та підтриманню біорізноманіття, створюючи умови для існування різних груп організмів, включаючи птахів, комах і ґрунтову біоту. Вони виступають осередками біотичного різноманіття та забезпечують функціонування екологічних ніш у межах урбанізованих

ландшафтів. Таким чином, екологічна функція зелених насаджень має комплексний характер і охоплює широкий спектр процесів, спрямованих на стабілізацію та відновлення екологічної рівноваги в міських екосистемах.

Важливим аспектом екологічної ролі зелених насаджень є їхній вплив на збереження біорізноманіття в межах міських екосистем. Урбанізовані території часто характеризуються високим рівнем фрагментації середовища існування, що призводить до ізоляції природних оселищ, зменшення чисельності видів і порушення екологічних зв'язків між популяціями. У таких умовах знижується стійкість біоценозів, зростає ризик втрати видового різноманіття та порушується функціонування екосистемних процесів.

Зелені насадження, особливо парки, сквери та зелені коридори, формують осередки біотичного різноманіття та сприяють підтриманню екологічних зв'язків між природними територіями [8; 9]. Вони виконують роль так званих “екологічних рефугіумів”, у межах яких створюються сприятливі умови для існування різних груп організмів, включаючи рослини, безхребетних, птахів та дрібних ссавців. Наявність різнорівневої рослинності, включаючи деревний, чагарниковий і трав'яний яруси, забезпечує формування різноманітних екологічних ніш та підвищує видову насиченість урбанізованих територій.

Особливу роль відіграють зелені коридори, які забезпечують просторову зв'язаність екосистем і сприяють міграції видів, обміну генетичним матеріалом та відновленню популяцій. Вони дозволяють зменшити негативні наслідки ізоляції оселищ і підвищують екологічну стійкість міських ландшафтів. У цьому контексті зелені насадження розглядаються як ключовий елемент екологічної мережі міста, що забезпечує інтеграцію окремих природних компонентів у єдину функціональну систему.

Крім того, зелені насадження створюють сприятливі мікрокліматичні умови, які додатково підтримують біорізноманіття, знижуючи температурні коливання, підвищуючи вологість і формуючи більш стабільні екологічні умови для існування живих організмів. Це особливо важливо в умовах кліматичних змін, коли

підвищується значення локальних екологічних факторів у збереженні біотичного різноманіття.

Таким чином, зелені насадження виконують не лише роль елементів озеленення, а й виступають важливими структурними компонентами міських екосистем, що забезпечують збереження біорізноманіття, підтримання екологічної рівноваги та підвищення стійкості урбанізованого середовища.

Окреме місце серед функцій зелених насаджень займає мікрокліматорегульовальна функція, яка є однією з ключових у формуванні комфортного та екологічно збалансованого міського середовища. Дослідження показують, що рослинність істотно впливає на температурний режим міських територій, знижуючи температуру повітря внаслідок процесів транспірації, затінення та зменшення теплового випромінювання поверхонь [10; 11]. У процесі транспірації відбувається випаровування води з поверхні листків, що супроводжується поглинанням теплової енергії та сприяє охолодженню навколишнього повітря. Одночасно затінення підстильної поверхні зменшує її нагрівання та знижує інтенсивність вторинного теплового випромінювання.

Це особливо важливо в умовах формування ефекту міського теплового острова, який є характерною рисою сучасних мегаполісів [12]. Урбанізовані території накопичують значну кількість теплової енергії через високу частку штучних матеріалів, таких як асфальт і бетон, які мають високу теплоємність і низьку здатність до випаровування. У таких умовах зелені насадження виступають природним механізмом компенсації теплового навантаження, формуючи локальні охолоджувальні зони.

За даними експериментальних досліджень, різниця температур між озеленими та незеленими ділянками може становити 2–4 °C, а в окремих випадках навіть перевищувати ці значення залежно від густоти насаджень, площі листової поверхні та просторової структури рослинності [13]. Це свідчить про значну роль зелених насаджень у регуляції теплового балансу та зниженні температурного стресу в міському середовищі.

Крім того, зелені насадження впливають не лише на температуру повітря, але й на інші мікрокліматичні параметри, зокрема відносну вологість, швидкість руху повітря та радіаційний баланс. Підвищення вологості повітря внаслідок транспірації сприяє зменшенню дефіциту насичення, тоді як зміна структури повітряних потоків у межах насаджень впливає на аеродинамічні характеристики міського середовища. Сукупність цих процесів забезпечує формування більш стабільних і комфортних мікрокліматичних умов у межах урбанізованих територій.

Таким чином, мікрокліматорегулювальна функція зелених насаджень має комплексний характер і відіграє важливу роль у пом'якшенні негативних наслідків урбанізації, адаптації міст до кліматичних змін та підвищенні екологічної комфортності середовища проживання населення.

Крім температурного режиму, зелені насадження істотно впливають на інші ключові мікрокліматичні параметри, зокрема вологість повітря, швидкість вітру та рівень сонячної радіації. Завдяки процесам транспірації рослинність сприяє підвищенню відносної вологості повітря, що є важливим чинником формування комфортного мікроклімату, особливо в умовах підвищених температур і дефіциту вологи. Підвищення вологості зменшує інтенсивність випаровування з поверхні ґрунту та штучних покриттів, а також знижує рівень теплового стресу для населення. Встановлено, що насадження здатні знижувати швидкість вітру на 20–40 % залежно від густоти крони, висоти дерев та структури посадок [14]. Рослинність виступає природним вітрозахисним бар'єром, змінюючи напрямок і швидкість повітряних потоків, зменшуючи турбулентність та сприяючи формуванню більш стабільного аеродинамічного режиму. Це сприяє підвищенню комфорту міського середовища, зменшенню впливу холодних і гарячих повітряних мас, а також зниженню негативного впливу екстремальних погодних явищ, таких як сильні вітри та пилові бурі.

Зелені насадження також відіграють важливу роль у регулюванні сонячної радіації. Крони дерев зменшують надходження прямої сонячної радіації до підстильної поверхні, що сприяє зниженню її нагрівання та обмежує вторинне

теплове випромінювання. Це особливо важливо для урбанізованих територій, де значну частку займають поверхні з високою теплоємністю, такі як асфальт і бетон.

Водночас рослинність регулює водний баланс міських територій, сприяючи затриманню атмосферних опадів, інфільтрації води в ґрунт і зменшенню поверхневого стоку [15]. Листковий покрив перехоплює частину опадів, що зменшує їх безпосереднє потрапляння на поверхню ґрунту, тоді як коренева система дерев сприяє покращенню структури ґрунту та підвищенню його водопроникності. У результаті зменшується ризик утворення поверхневого стоку, ерозійних процесів і перевантаження міських дренажних систем.

Таким чином, вплив зелених насаджень на вологість повітря, вітровий режим, сонячну радіацію та водний баланс має комплексний характер і забезпечує формування більш стабільних, екологічно збалансованих і комфортних умов у межах міських територій.

Суттєвою є санітарно-гігієнічна функція зелених насаджень, яка полягає у зниженні рівня шумового забруднення, очищенні повітря та створенні сприятливого середовища для проживання населення. У сучасних урбанізованих умовах, де зростає інтенсивність транспортних потоків і промислових навантажень, ця функція набуває особливого значення як фактор забезпечення екологічної безпеки та збереження здоров'я населення.

Зелені насадження виконують роль природних шумових бар'єрів, знижуючи рівень шуму на 5–10 дБ залежно від структури посадок, густоти та висоти рослинності [16]. Ефект шумопоглинання досягається завдяки розсіюванню, відбиттю та частковому поглинанню звукових хвиль листовою масою, гілками та стовбурами дерев. Найбільш ефективними є багаторусні насадження, що поєднують деревний і чагарниковий яруси, які забезпечують більш повне екранування шуму та зниження його інтенсивності.

Крім того, зелені насадження сприяють очищенню атмосферного повітря від забруднювальних речовин і біологічних агентів. Вони здатні акумулювати пил, токсичні гази та аерозолі, а також зменшувати концентрацію патогенних мікроорганізмів у повітрі. Важливу роль у цьому відіграють фітонциди — біологічно

активні речовини, що виділяються рослинами та мають антимікробні властивості. Фітонцидна активність зелених насаджень сприяє знезараженню повітряного середовища, зниженню рівня бактеріального забруднення та покращенню санітарно-гігієнічних умов у містах [17].

Окрім цього, зелені насадження позитивно впливають на психофізіологічний стан людини, знижуючи рівень стресу, покращуючи самопочуття та сприяючи загальному оздоровленню населення. Формування сприятливого мікроклімату, зменшення шумового навантаження та покращення якості повітря створюють умови для підвищення якості життя в урбанізованому середовищі.

Таким чином, санітарно-гігієнічна функція зелених насаджень має комплексний характер і охоплює широкий спектр процесів, спрямованих на покращення якості середовища, зниження рівня екологічних ризиків та забезпечення здоров'я населення в умовах урбанізації.

Рекреаційна функція зелених насаджень полягає у створенні умов для відпочинку, фізичної активності та психологічного відновлення населення. У сучасних умовах урбанізації, що супроводжується високим рівнем стресу, шумового та інформаційного навантаження, значення зелених зон як простору для відновлення фізичних і психоемоційних ресурсів людини суттєво зростає.

У наукових дослідженнях доведено, що перебування в зеленому середовищі сприяє зниженню рівня стресу, нормалізації психоемоційного стану та підвищенню загального рівня добробуту [18; 19]. Взаємодія з природними компонентами, такими як деревна рослинність, зелений покрив і природні ландшафти, позитивно впливає на функціонування нервової системи, сприяє зниженню тривожності, покращенню концентрації уваги та загальному відновленню когнітивних функцій.

Парки, сквери та інші озеленені території виступають важливими просторами соціальної взаємодії, що сприяє формуванню соціального капіталу міських громад [20]. Вони забезпечують умови для спілкування, проведення культурних і спортивних заходів, а також сприяють розвитку громадської активності та інтеграції різних соціальних груп. Наявність доступних зелених зон підвищує рівень соціальної

згуртованості та формує позитивний соціально-психологічний клімат у міському середовищі.

Крім того, рекреаційні території сприяють розвитку фізичної активності населення, забезпечуючи можливості для занять спортом, прогулянок і активного відпочинку. Це має важливе значення для профілактики захворювань, підвищення фізичного здоров'я та загального рівня життєдіяльності населення.

Таким чином, рекреаційна функція зелених насаджень має комплексний характер і охоплює фізичні, психологічні та соціальні аспекти, забезпечуючи формування комфортного, безпечного та сприятливого для життя міського середовища.

Соціальна функція зелених насаджень також проявляється у формуванні естетичного образу міста та підвищенні привабливості міського середовища. Зелені насадження формують ландшафтну структуру міста, створюють візуальний комфорт і сприяють розвитку туризму [21]. Вони відіграють важливу роль у просторовій організації урбанізованих територій, пом'якшуючи жорсткість архітектурних форм, гармонізуючи поєднання природних і штучних елементів та формуючи цілісний візуальний образ міського середовища.

Естетичне значення зелених насаджень проявляється у створенні різноманітних ландшафтних композицій, зміні сезонного вигляду територій, кольорової палітри та текстури міського простору. Наявність зелених зон підвищує рівень візуальної привабливості міста, позитивно впливає на сприйняття урбанізованого середовища та сприяє формуванню комфортного психологічного фону для його мешканців.

Водночас зелені насадження відіграють важливу роль у формуванні культурної ідентичності міських територій. Вони можуть виступати символічними елементами міського простору, пов'язаними з історією, традиціями та культурною спадщиною регіону. Парки, алеї, ботанічні сади та інші зелені об'єкти стають місцями культурної пам'яті, проведення громадських заходів і формування локальної ідентичності.

Крім того, зелені насадження сприяють розвитку туристичної привабливості міст, оскільки формують унікальні природно-ландшафтні комплекси, що приваблюють відвідувачів і підвищують конкурентоспроможність міського середовища. Вони

створюють сприятливі умови для рекреації, екотуризму та культурного відпочинку, що має важливе значення для соціально-економічного розвитку територій.

Таким чином, соціальна функція зелених насаджень має багатовимірний характер і охоплює естетичні, культурні та соціальні аспекти, сприяючи формуванню гармонійного, привабливого та комфортного міського середовища.

Економічна функція зелених насаджень полягає у підвищенні вартості нерухомості, зменшенні витрат на енергоспоживання та зниженні витрат на охорону здоров'я населення. У сучасних умовах урбанізації зелені насадження розглядаються не лише як екологічний, а й як важливий економічний ресурс, що забезпечує підвищення інвестиційної привабливості міських територій і сприяє сталому розвитку урбанізованого середовища.

Дослідження свідчать, що наявність зелених зон підвищує ринкову вартість житлової нерухомості на 5–20 % залежно від їх доступності, якості та рівня благоустрою [22]. Близькість до парків, скверів і озелених територій формує більш привабливе житлове середовище, що безпосередньо впливає на попит на нерухомість і її ринкову ціну. У цьому контексті зелені насадження виступають важливим фактором просторового розвитку міст та підвищення їх конкурентоспроможності.

Крім того, зелені насадження сприяють зменшенню витрат на енергоспоживання, зокрема на кондиціонування приміщень у літній період, завдяки зниженню температури повітря та формуванню більш сприятливого мікроклімату [23]. Затінення будівель і прилеглих територій, а також зменшення теплового навантаження дозволяють скоротити споживання електроенергії, що має економічний ефект як для домогосподарств, так і для міської інфраструктури загалом. Важливим аспектом економічної функції є також опосередкований вплив зелених насаджень на зниження витрат у сфері охорони здоров'я. Покращення якості повітря, зниження рівня шуму та створення умов для фізичної активності населення сприяють зменшенню захворюваності, підвищенню рівня здоров'я та, відповідно, скороченню витрат на медичне обслуговування. Таким чином, зелені насадження виконують превентивну функцію, знижуючи економічні втрати, пов'язані з негативним впливом урбанізованого середовища на здоров'я населення.

Крім того, розвиток зелених зон сприяє формуванню додаткових економічних можливостей, зокрема у сфері туризму, рекреації та малого бізнесу, пов'язаного з обслуговуванням відвідувачів парків і скверів. Це підвищує економічну активність територій та сприяє їх комплексному розвитку.

Таким чином, економічна функція зелених насаджень має багатовимірний характер і охоплює прямі та опосередковані економічні ефекти, пов'язані з підвищенням вартості нерухомості, зниженням енергетичних витрат, покращенням здоров'я населення та розвитком міської економіки в цілому.

У сучасних концепціях міського розвитку зелені насадження розглядаються як складова зеленої інфраструктури, що забезпечує надання екосистемних послуг населенню. Зелена інфраструктура виступає інтегрованою системою природних і напівприродних елементів, які функціонують у межах урбанізованого середовища та забезпечують підтримання екологічної рівноваги, підвищення якості життя населення та стійкість міських екосистем до антропогенних впливів.

Концепція екосистемних послуг передбачає оцінку ролі природних компонентів у забезпеченні матеріальних, регулювальних і культурних потреб суспільства [24]. У цьому контексті зелені насадження забезпечують широкий спектр послуг, серед яких виділяють регулювальні (регуляція клімату, очищення повітря, водного балансу), підтримувальні (збереження біорізноманіття, формування ґрунтового покриву), культурні (рекреація, естетична та культурна цінність) та частково матеріальні (ресурсні) функції. Такий підхід дозволяє розглядати зелені насадження не лише як елемент благоустрою, а як важливий компонент функціонування міських екосистем. У цьому контексті зелені насадження розглядаються як важливий інструмент адаптації міст до змін клімату та підвищення їхньої стійкості [25]. Вони сприяють зменшенню негативних наслідків кліматичних змін, таких як підвищення температури повітря, частота теплових хвиль, дефіцит вологи та екстремальні погодні явища. Завдяки своїм мікрокліматорегулювальним властивостям зелені насадження здатні пом'якшувати вплив ефекту міського теплового острова, знижувати теплове навантаження та формувати більш стабільні умови для функціонування міських екосистем.

Крім того, інтеграція зелених насаджень у структуру міського середовища сприяє підвищенню адаптивного потенціалу урбанізованих територій, забезпечуючи їх здатність реагувати на зміну кліматичних умов і зменшувати екологічні ризики. Таким чином, зелена інфраструктура розглядається як стратегічний елемент сталого міського розвитку, що поєднує екологічні, соціальні та економічні функції в єдиній системі.

Таким чином, аналіз наукової літератури свідчить про багатофункціональність зелених насаджень у місті та їх визначальну роль у формуванні екологічно збалансованого урбанізованого середовища. Вони виконують широкий спектр екологічних, мікрокліматорегулювальних, санітарно-гігієнічних, рекреаційних, соціальних та економічних функцій, що забезпечують підтримання екологічної рівноваги, підвищення якості життя населення та формування сталого міського середовища.

Комплексний характер впливу зелених насаджень проявляється у взаємодії різних екосистемних процесів, що забезпечують регуляцію температурного та вологісного режимів, очищення повітря, зниження рівня шумового навантаження, підтримання біорізноманіття та створення сприятливих умов для життєдіяльності людини. Водночас їх функціонування визначається не лише загальною наявністю рослинності, а й видовим складом, морфофункціональними особливостями дерев, структурою насаджень і умовами міського середовища.

У сучасних умовах урбанізації значення зелених насаджень постійно зростає у зв'язку з посиленням антропогенного навантаження, змінами клімату та необхідністю адаптації міських екосистем до нових екологічних викликів. Зелена інфраструктура розглядається як один із ключових інструментів забезпечення стійкості міст, що поєднує екологічні, соціальні та економічні аспекти їх розвитку.

Разом з тим, незважаючи на значну кількість досліджень у цій сфері, залишаються недостатньо вивченими питання, пов'язані з видоспецифічними особливостями впливу інтродукованих видів дендрофлори на формування мікрокліматичних параметрів у межах міських територій. Недостатньо розкритими є також механізми

взаємодії морфологічних характеристик дерев, просторової структури їх крон і фізіологічного стану з параметрами підкоронового мікроклімату.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення комплексних досліджень, спрямованих на уточнення ролі інтродукованих видів дерев у формуванні мікрокліматичних умов міських екосистем, а також на обґрунтування підходів до оптимізації структури та функціонування міської зеленої інфраструктури. Це визначає актуальність подальших наукових досліджень у даному напрямі та обґрунтовує вибір теми дисертаційної роботи.

1.2 Роль міських зелених насаджень у формуванні мікроклімату та адаптації міст до змін клімату

У сучасних умовах глобальних кліматичних змін і посилення процесів урбанізації роль зелених насаджень у формуванні мікроклімату міського середовища істотно зростає. Урбанізовані території характеризуються підвищеним тепловим навантаженням, порушенням водного балансу та зміною радіаційного режиму, що зумовлює формування несприятливих мікрокліматичних умов для населення. Зростання частоти екстремальних температур, теплових хвиль і періодів посухи актуалізує необхідність впровадження ефективних механізмів адаптації міських екосистем до змін клімату.

У наукових дослідженнях останніх років підкреслюється, що зелена інфраструктура є одним із ключових природоорієнтованих інструментів адаптації міст до кліматичних змін, оскільки здатна ефективно регулювати температурний режим, вологість повітря, радіаційний баланс і аеродинамічні характеристики урбанізованого середовища [26; 27]. Завдяки процесам транспірації, затінення, акумулювання та перерозподілу теплової енергії рослинність формує локальні мікрокліматичні умови, що суттєво відрізняються від умов на відкритих урбанізованих поверхнях.

Зелені насадження здатні пом'якшувати прояви ефекту міського теплового острова, знижуючи температуру повітря, підвищуючи відносну вологість і забезпечуючи більш стабільний мікроклімат у межах міських територій. Вони також впливають на циркуляцію повітряних мас, зменшуючи швидкість вітру та змінюючи його напрямок, що сприяє формуванню більш комфортного аеродинамічного режиму. Крім того, рослинність регулює надходження сонячної радіації, зменшуючи перегрівання підстильної поверхні та обмежуючи вторинне теплове випромінювання. У сучасній урбаністичній науці зелені насадження розглядаються як невід'ємний компонент кліматично стійких міст, що забезпечує підвищення адаптивного потенціалу урбанізованих територій та зменшення їх вразливості до кліматичних ризиків. Інтеграція зелених насаджень у структуру міського простору дозволяє формувати більш стійкі та екологічно збалансовані системи, здатні ефективно реагувати на зміну кліматичних умов.

Таким чином, зростання ролі зелених насаджень у регуляції мікроклімату міського середовища визначає необхідність їх детального наукового дослідження, зокрема в аспекті оцінки видоспецифічних особливостей впливу деревної рослинності на мікрокліматичні параметри урбанізованих територій.

Одним із найбільш досліджених аспектів впливу зелених насаджень є зниження температури повітря в міському середовищі. Це досягається завдяки комплексній дії таких процесів, як транспірація, затінення поверхонь і зменшення акумуляції тепла штучними матеріалами [28; 29]. У процесі транспірації відбувається випаровування води з поверхні листків, що супроводжується поглинанням теплової енергії та сприяє охолодженню навколишнього повітря. Одночасно затінення підстильної поверхні знижує її нагрівання, обмежує інтенсивність теплового випромінювання та запобігає перегріванню урбанізованих територій.

Важливим фактором є також здатність зелених насаджень зменшувати акумуляцію тепла штучними матеріалами, такими як асфальт і бетон, які характеризуються високою теплоємністю та повільним віддаванням теплової енергії. Завдяки цьому рослинність знижує інтенсивність формування ефекту міського

теплового острова та сприяє стабілізації температурного режиму в межах міського середовища.

За результатами сучасних метааналізів встановлено, що озеленені території можуть знижувати температуру повітря в середньому на 1–3 °С, а локально — до 4–5 °С залежно від морфології забудови, щільності рослинності та просторової структури насаджень [30]. Ефективність охолоджувального впливу значною мірою визначається такими факторами, як площа зелених насаджень, щільність і висота деревостану, видовий склад рослинності та конфігурація міського простору.

Особливо значущим є вплив дерев із розвиненою листковою поверхнею, які формують стабільні прохолодні мікрокліматичні осередки в межах щільної забудови. Велика площа листків забезпечує інтенсивні процеси транспірації та ефективне затінення, що сприяє формуванню локальних зон знижених температур. Такі мікрокліматичні осередки мають важливе значення для зменшення теплового стресу населення та підвищення комфортності міського середовища.

Таким чином, зниження температури повітря під впливом зелених насаджень є результатом взаємодії фізіологічних процесів рослин та фізичних характеристик міського середовища, що визначає їх ключову роль у регуляції мікроклімату та адаптації урбанізованих територій до кліматичних змін.

Важливим напрямом сучасних досліджень є вивчення ролі зелених насаджень у зменшенні ефекту міського теплового острова. Урбанізовані території характеризуються підвищеною температурою повітря порівняно з прилеглими природними ландшафтами через високу щільність забудови, значну площу штучних покриттів і дефіцит рослинності [31]. Додатковими чинниками формування ефекту міського теплового острова є висока теплоємність і теплопровідність будівельних матеріалів, зменшення випаровування вологи, обмежена циркуляція повітря та інтенсивне тепловиділення внаслідок діяльності людини.

У таких умовах зелені насадження виступають ефективним природним механізмом пом'якшення температурних аномалій. Завдяки процесам транспірації, затінення та зміни радіаційного балансу вони здатні знижувати температуру повітря, зменшувати нагрівання підстильної поверхні та обмежувати накопичення теплової

енергії в міському середовищі. Особливу роль відіграє здатність рослинності підвищувати вологість повітря, що додатково сприяє охолодженню через процеси випаровування.

Зелені насадження, особливо великі міські парки та лісопаркові масиви, формують так звані охолоджувальні осередки, які можуть поширювати свій вплив на прилеглі території на сотні метрів [32]. Ці «зелені оазиси» створюють локальні зони знижених температур, що контрастують із перегрітими урбанізованими ділянками та формують більш комфортні умови для населення.

Ефективність такого охолоджувального впливу залежить від площі зелених насаджень, їх просторової конфігурації, видового складу та щільності рослинності. Великі безперервні зелені масиви мають більш виражений вплив на мікроклімат, тоді як фрагментовані насадження забезпечують локальний, менш інтенсивний ефект. Важливим є також розташування зелених зон у структурі міста, оскільки вони можуть впливати на розподіл повітряних потоків і температурних полів.

Таким чином, зелені насадження відіграють ключову роль у зменшенні ефекту міського теплового острова, формуючи локальні охолоджувальні зони та сприяючи вирівнюванню температурних контрастів у межах урбанізованого середовища, що має важливе значення для адаптації міст до кліматичних змін і підвищення екологічної комфортності проживання населення.

Окрім температурного режиму, зелені насадження істотно впливають на вологість повітря, що є одним із ключових параметрів мікроклімату урбанізованого середовища. Завдяки процесам транспірації рослинність сприяє надходженню водяної пари в атмосферу, підвищуючи відносну вологість і зменшуючи дефіцит насичення повітря, що є важливим чинником формування комфортного мікроклімату в умовах літніх хвиль спеки [33]. Зменшення дефіциту насичення повітря сприяє покращенню теплового самопочуття людини та знижує рівень теплового стресу.

Інтенсивність транспіраційних процесів залежить від видового складу рослинності, площі листової поверхні, фізіологічного стану рослин, а також від метеорологічних умов. Деревя з розвинуеною листовою поверхнею здатні

забезпечувати більш інтенсивне випаровування води, що призводить до формування локальних зон підвищеної вологості повітря в підкрановому просторі.

Сучасні дослідження також підтверджують, що зелені насадження сприяють зниженню температури поверхонь, що опосередковано впливає на зменшення теплового навантаження на міське населення. Зменшення нагрівання підстильної поверхні призводить до зниження інтенсивності випаровування з неї та формування більш стабільного температурно-вологісного режиму в межах міських територій.

Крім того, рослинність впливає на водний баланс міського середовища, сприяючи затриманню вологи в ґрунті, підвищенню інфільтрації та зменшенню поверхневого стоку. Це забезпечує більш рівномірний розподіл вологи та створює сприятливі умови для підтримання мікрокліматичної стабільності.

Таким чином, вплив зелених насаджень на вологість повітря має комплексний характер і є важливим елементом регуляції мікроклімату, особливо в умовах підвищених температур і кліматичних змін, що підкреслює їх значення у формуванні комфортного та екологічно безпечного міського середовища.

Важливою складовою мікрокліматорегулювальної ролі зелених насаджень є їхній вплив на рух повітряних мас. Встановлено, що зелені насадження можуть як зменшувати швидкість вітру, так і сприяти вентиляції міського простору залежно від їх просторової структури, щільності та морфології [34]. Аеродинамічний ефект рослинності визначається такими параметрами, як висота дерев, густота крони, ступінь її проникності для повітряних потоків та конфігурація насаджень у міському просторі.

У щільній забудові зелені насадження виконують функцію вітрозахисних бар'єрів, знижуючи швидкість повітряних потоків, зменшуючи їх турбулентність і обмежуючи проникнення сильних вітрів у житлові та рекреаційні зони. Це сприяє підвищенню комфортності середовища для населення, особливо в умовах несприятливих погодних явищ, таких як сильні вітри або пилові бурі. Найбільш ефективними є багаторядні насадження, що поєднують деревний і чагарниковий яруси, які забезпечують поступове гальмування повітряних потоків.

Водночас за певних умов зелені насадження можуть сприяти покращенню вентиляції міського середовища. Просторово організовані зелені коридори та розриви в насадженнях забезпечують циркуляцію повітря, що сприяє видаленню надлишкового тепла та забруднювальних речовин. Така функція особливо важлива для густозабудованих районів, де обмежена природна вентиляція призводить до накопичення тепла та забруднювачів.

Крім того, взаємодія зелених насаджень із повітряними потоками впливає на розподіл температури та вологості в межах підкоронового простору, формуючи більш стабільні мікрокліматичні умови. Регулювання швидкості вітру сприяє зменшенню інтенсивності випаровування та підтриманню оптимального водного балансу як у ґрунті, так і в атмосферному повітрі.

Таким чином, вплив зелених насаджень на рух повітряних мас має комплексний характер і відіграє важливу роль у формуванні аеродинамічного режиму міського середовища, забезпечуючи одночасно захисні та вентиляційні функції, що сприяють підвищенню екологічної комфортності урбанізованих територій.

Сучасні дослідження також акцентують увагу на ролі зелених насаджень у регулюванні радіаційного балансу міських територій. Крони дерев зменшують надходження прямої сонячної радіації до поверхні, що сприяє зниженню нагрівання дорожніх покриттів і фасадів будівель [35]. Завдяки затіненню значно зменшується кількість короткохвильової сонячної енергії, що досягає підстильної поверхні, що, у свою чергу, обмежує її перегрівання та знижує інтенсивність довгохвильового теплового випромінювання.

Важливим механізмом є також вплив рослинності на альбедо поверхні та перерозподіл радіаційних потоків. Зелені насадження мають інші оптичні властивості порівняно зі штучними матеріалами, що сприяє зміні співвідношення поглинутої та відбитої сонячної енергії. У результаті формується більш сприятливий радіаційний режим, який запобігає надмірному накопиченню тепла в межах урбанізованого середовища.

Крім того, завдяки зниженню температури поверхонь зменшується інтенсивність теплового випромінювання в навколишнє середовище, що сприяє

стабілізації температурного режиму в приземному шарі повітря. Це має особливе значення в умовах щільної забудови, де акумуляція тепла будівельними матеріалами є одним із ключових факторів формування ефекту міського теплового острова.

Це, у свою чергу, зменшує енергоспоживання будівель у літній період і підвищує ефективність пасивного кліматичного контролю. Затінення фасадів будівель і прилеглих територій дозволяє скоротити потребу в кондиціонуванні, що має важливий економічний і екологічний ефект, зокрема зниження викидів парникових газів, пов'язаних із виробництвом енергії.

Таким чином, вплив зелених насаджень на радіаційний баланс є важливим елементом регуляції мікроклімату міського середовища, який забезпечує зниження теплового навантаження, підвищення енергоефективності та формування більш стабільних і комфортних умов у межах урбанізованих територій.

Окремим напрямом сучасних досліджень є вивчення ролі зелених насаджень як інструменту адаптації до екстремальних кліматичних явищ. У контексті змін клімату вони розглядаються як важливий елемент природоорієнтованих рішень (nature-based solutions), здатних зменшувати ризики перегріву міст, знижувати навантаження на інженерну інфраструктуру та підвищувати кліматичну стійкість урбанізованих територій [36; 37].

Зростання частоти та інтенсивності екстремальних погодних явищ, таких як теплові хвилі, посухи, зливові опади та сильні вітри, зумовлює необхідність впровадження ефективних адаптаційних заходів у міському середовищі. Зелені насадження здатні пом'якшувати наслідки таких явищ завдяки своїм мікрокліматорегулювальним, гідрологічним та екологічним функціям. Зокрема, вони знижують пікові температури під час теплових хвиль, підвищують вологість повітря та створюють локальні охолоджувальні зони, що зменшує тепловий стрес для населення.

Водночас зелені насадження відіграють важливу роль у регуляції водного режиму міських територій, сприяючи затриманню атмосферних опадів, інфільтрації води в ґрунт і зменшенню поверхневого стоку. Це дозволяє знижувати ризик

підтоплень і перевантаження дренажних систем під час інтенсивних опадів, що є особливо актуальним для великих міст.

Крім того, інтеграція зелених насаджень у структуру міського простору сприяє підвищенню стійкості інженерної інфраструктури, зменшуючи потребу в енергозатратних технічних рішеннях для охолодження та водовідведення. Таким чином, зелені насадження виступають ефективною альтернативою або доповненням до традиційних інженерних підходів у забезпеченні кліматичної адаптації міст.

У сучасних наукових підходах зелені насадження розглядаються як ключовий компонент кліматично орієнтованого планування міських територій, що забезпечує інтеграцію екологічних, соціальних і економічних функцій у єдину систему. Це підкреслює їх стратегічне значення як інструменту формування стійких і адаптивних урбанізованих екосистем.

Водночас ефективність зелених насаджень у формуванні мікроклімату значною мірою залежить від їх видового складу, структури та просторового розміщення. Характер впливу рослинності на температурний, вологісний та аеродинамічний режими визначається сукупністю морфологічних і фізіологічних особливостей дерев, а також їх взаємодією з елементами міського середовища.

Сучасні дослідження підкреслюють важливість врахування морфологічних характеристик рослин (щільність крони, площа листкової поверхні, висота, сезонна динаміка) при плануванні міських зелених просторів [38]. Щільна та добре розвинена крона забезпечує ефективне затінення і зменшує надходження сонячної радіації до підстильної поверхні, тоді як велика площа листкової поверхні сприяє інтенсивним процесам транспірації, що підсилює охолоджувальний ефект. Висота дерев і структура їх розміщення визначають характер циркуляції повітряних мас, впливаючи на швидкість вітру та розподіл мікрокліматичних показників у межах підкоронового простору.

Важливим аспектом є також сезонна динаміка функціонування рослинності, яка визначає зміну інтенсивності мікрокліматорегулювальних процесів протягом вегетаційного періоду. У літній період максимальний розвиток листкової поверхні

забезпечує найбільш виражений охолоджувальний ефект, тоді як у міжсезоння цей вплив зменшується.

Особливу увагу приділяють інтродукованим видам, які демонструють високу адаптивність до урбанізованих умов і здатні ефективно виконувати мікрокліматорегульовальні функції. Завдяки своїм біологічним особливостям вони можуть витримувати підвищене температурне навантаження, дефіцит вологи та забруднення повітря, зберігаючи при цьому функціональну активність. Водночас різні інтродуковані види відрізняються за морфофункціональними характеристиками, що зумовлює відмінності в їх впливі на мікроклімат.

Таким чином, урахування видового складу, морфологічних характеристик і просторової структури зелених насаджень є ключовою умовою підвищення ефективності їх мікрокліматорегульовальної ролі та оптимізації зеленої інфраструктури міських територій.

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують ключову роль зелених насаджень у формуванні мікроклімату міського середовища та адаптації міст до змін клімату. Їх вплив має комплексний характер і реалізується через сукупність фізичних, біологічних та екологічних процесів, що забезпечують регуляцію температурного режиму, вологості повітря, вітрового режиму та радіаційного балансу.

Зелені насадження виступають важливим елементом сталого міського розвитку, оскільки здатні зменшувати прояви ефекту міського теплового острова, знижувати теплове навантаження на населення, покращувати якість повітря та створювати більш комфортні умови для життєдіяльності людини. Водночас їх ефективність значною мірою залежить від видового складу, морфофункціональних характеристик рослин та просторової організації зелених насаджень у межах міського середовища.

У сучасних умовах кліматичних змін значення зелених насаджень як природного інструменту адаптації постійно зростає. Вони забезпечують підвищення стійкості урбанізованих територій до екстремальних кліматичних явищ, сприяють стабілізації мікрокліматичних умов та зменшують екологічні ризики, пов'язані з перегрівом і деградацією міського середовища.

Разом з тим, незважаючи на значну кількість наукових досліджень, залишаються недостатньо вивченими питання, пов'язані з видоспецифічними особливостями впливу інтродукованих видів дерев на мікрокліматичні параметри, а також механізмами взаємодії мікрокліматичних умов із фізіологічним станом рослин. Особливо актуальним є дослідження взаємозв'язку між параметрами мікроклімату та водним статусом листків як показником адаптації рослин до умов урбанізованого середовища.

У зв'язку з цим виникає необхідність подальших досліджень у напрямі оптимізації структури та функціонування міської зеленої інфраструктури, з урахуванням видового складу, морфологічних характеристик рослин і їх адаптаційного потенціалу. Це визначає наукову доцільність і практичну значущість досліджень, спрямованих на поглиблене вивчення ролі зелених насаджень у формуванні мікроклімату міських екосистем.

1.3 Екологічні особливості інтродукції нових видів дерев у міських зелених зонах

У сучасних умовах урбанізації інтродукція нових видів дерев є важливим напрямом розвитку міської зеленої інфраструктури, оскільки дозволяє підвищити екологічну ефективність насаджень, адаптувати їх до змін клімату та забезпечити стабільність функціонування урбоекосистем. Використання інтродукованих видів розширює асортимент деревної рослинності, підвищує стійкість зелених насаджень до несприятливих факторів середовища та дозволяє формувати більш адаптивні й функціонально ефективні зелені системи в межах міст.

У науковій літературі інтродукція розглядається як складний екологічний процес, що передбачає перенесення видів за межі їх природного ареалу з подальшою адаптацією до нових умов середовища [39; 40]. Цей процес включає низку етапів, зокрема акліматизацію, натуралізацію та інтеграцію виду в нові екологічні умови, що

супроводжується змінами його фізіологічних, морфологічних і екологічних характеристик.

У міських умовах інтродукція набуває особливої актуальності через інтенсивний антропогенний вплив, трансформацію ґрунтів, зміну гідрологічного режиму та підвищений рівень забруднення. Урбанізоване середовище створює специфічні стресові умови для рослин, включаючи підвищені температури, дефіцит вологи, ущільнення ґрунтів і обмежений простір для розвитку кореневої системи. У таких умовах інтродуковані види, що характеризуються високою екологічною пластичністю та стійкістю до стресових факторів, можуть відігравати важливу роль у формуванні ефективних зелених насаджень.

Водночас ефективність використання інтродукованих видів визначається їх здатністю адаптуватися до локальних умов, зберігати життєздатність і виконувати екосистемні функції, зокрема мікрокліматорегульовальну. Різні види можуть суттєво відрізнятися за інтенсивністю транспірації, структурою крони, площею листової поверхні та іншими морфофункціональними характеристиками, що безпосередньо впливає на їх роль у формуванні мікроклімату.

Таким чином, інтродукція деревних видів у міське середовище є складним багатофакторним процесом, що поєднує екологічні, фізіологічні та урбаністичні аспекти та потребує комплексного наукового обґрунтування з урахуванням особливостей функціонування міських екосистем.

Сучасні дослідження свідчать, що успішність інтродукції нових видів дерев значною мірою визначається їхньою екологічною пластичністю, адаптаційним потенціалом і здатністю витримувати комплекс урбанізаційних факторів, зокрема підвищені температури, дефіцит вологи, ущільнення ґрунтів і забруднення повітря [41]. Умови міського середовища створюють багатофакторний стресовий тиск на рослини, що вимагає від них високого рівня адаптивності та здатності підтримувати стабільне функціонування фізіологічних процесів.

У зв'язку з цим у наукових роботах останніх років особлива увага приділяється оцінці фізіологічних і морфологічних характеристик інтродукованих видів, зокрема інтенсивності транспірації, площі листової поверхні, стійкості до посухи та

здатності до фотосинтетичної активності в умовах урбанізованого середовища [42]. Важливими показниками є також здатність рослин регулювати водний обмін, підтримувати тургор клітин та ефективно використовувати доступні водні ресурси.

Інтенсивність транспірації визначає ефективність охолоджувального впливу рослинності на мікроклімат, тоді як площа листової поверхні безпосередньо пов'язана з рівнем поглинання сонячної радіації та інтенсивністю газообміну. Стійкість до посухи є критично важливою характеристикою для умов урбанізованого середовища, де доступ до вологи часто обмежений, а температурні навантаження підвищені.

Крім того, здатність інтродукованих видів підтримувати фотосинтетичну активність у стресових умовах визначає їх продуктивність і ефективність виконання екосистемних функцій. Це включає не лише накопичення біомаси, але й участь у регуляції газового складу атмосфери та мікрокліматичних параметрів.

Таким чином, оцінка морфофізіологічних характеристик інтродукованих видів є ключовою для визначення їх адаптаційного потенціалу та ефективності функціонування в умовах міського середовища. Особливе значення має аналіз показників водного статусу рослин, які відображають їх здатність реагувати на зміну мікрокліматичних умов і підтримувати життєдіяльність у стресових умовах урбанізації.

Однією з ключових екологічних особливостей інтродукції є адаптація видів до специфічних мікрокліматичних умов міста. Урбанізовані території характеризуються підвищеною температурою повітря, зниженим рівнем вологості, високою концентрацією забруднювачів і значною варіабельністю умов зростання [43]. Такі умови формують складний комплекс абіотичних стресових факторів, що впливають на фізіологічний стан рослин, їх ріст, розвиток і здатність виконувати екосистемні функції.

Адаптація інтродукованих видів до міського середовища супроводжується змінами у водному обміні, фотосинтетичній активності та структурі листового апарату. В умовах підвищених температур і дефіциту вологи рослини змушені оптимізувати транспіраційні процеси, регулювати відкриття продихів і підтримувати

водний баланс клітин, що є ключовими механізмами їх виживання. Здатність ефективно реагувати на такі стресові фактори визначає адаптаційний потенціал інтродукованих видів.

Дослідження показують, що інтродуковані види з високим рівнем толерантності до теплового стресу та атмосферного забруднення можуть ефективно виконувати екосистемні функції навіть у складних умовах міського середовища [44]. Такі види здатні зберігати стабільний рівень транспірації, підтримувати фотосинтетичну активність і забезпечувати мікрокліматорегульований ефект, незважаючи на несприятливі умови.

Водночас різні інтродуковані види характеризуються неоднаковою реакцією на мікрокліматичні умови, що зумовлює відмінності в їх ефективності як компонентів міської зеленої інфраструктури. Це підкреслює необхідність диференційованого підходу до їх використання з урахуванням морфофункціональних характеристик, екологічної пластичності та здатності адаптуватися до конкретних умов урбанізованого середовища.

Таким чином, адаптація інтродукованих видів до мікрокліматичних умов міста є визначальним фактором їх успішного функціонування та ефективності у формуванні міського мікроклімату, що обґрунтовує необхідність їх комплексного дослідження в умовах урбанізованих екосистем.

Важливим аспектом є взаємодія інтродукованих видів із місцевими екосистемами, яка має як позитивні, так і потенційно негативні наслідки. З одного боку, інтродуковані види можуть підвищувати біорізноманіття міських зелених зон і сприяти формуванню стійких рослинних угруповань [45]. Вони розширюють видовий склад насаджень, підвищують їх функціональну різноманітність і здатні займати екологічні ніші, які не повністю заповнені аборигенними видами, що сприяє підвищенню стійкості урбоекосистем до антропогенних впливів.

Крім того, інтродуковані види можуть відігравати важливу роль у відновленні деградованих територій, стабілізації ґрунтів і покращенні мікрокліматичних умов, що сприяє формуванню більш збалансованих екосистем у межах міста. Їх використання

дозволяє підвищити адаптивний потенціал зелених насаджень, особливо в умовах змін клімату.

З іншого боку, існують ризики біологічної інвазії, які можуть призводити до витіснення аборигенних видів, зміни структури біоценозів і трансформації екосистемних процесів [46]. Інвазійні види здатні активно поширюватися, конкурувати за ресурси (воду, світло, поживні речовини) та змінювати умови середовища, що може негативно впливати на локальне біорізноманіття. У деяких випадках вони можуть порушувати трофічні зв'язки, змінювати гідрологічний режим або сприяти деградації ґрунтового покриву.

У зв'язку з цим сучасні дослідження наголошують на необхідності екологічно обґрунтованого підходу до інтродукції нових видів із урахуванням їх потенційної інвазивності. Такий підхід передбачає попередню оцінку екологічної пластичності видів, їх конкурентоспроможності, здатності до розмноження та поширення, а також впливу на місцеві екосистеми. Особливе значення має моніторинг стану інтродукованих видів у міському середовищі та контроль за їх поширенням.

Таким чином, інтродукція деревних видів у міських екосистемах потребує збалансованого підходу, який поєднує використання їх позитивного екологічного потенціалу з мінімізацією можливих ризиків для біорізноманіття та стабільності урбоекосистем.

Суттєвим чинником успішності інтродукції є ґрунтові умови міського середовища, які значною мірою визначають ріст, розвиток і життєздатність деревних рослин. Урбанізовані ґрунти характеризуються ущільненням, зниженим вмістом органічної речовини, високим рівнем засолення та забруднення важкими металами [47]. Крім того, для них характерні порушення структури, зниження водопроникності, обмежений газообмін і нерівномірний розподіл вологи, що створює додаткові стресові умови для рослин.

Ущільнення ґрунтів призводить до зменшення порового простору, що обмежує доступ кисню до кореневої системи та ускладнює проникнення води, тоді як зниження вмісту органічної речовини негативно впливає на водоутримувальну здатність ґрунту. Забруднення важкими металами та іншими токсичними речовинами

може викликати порушення фізіологічних процесів, зокрема водного обміну, фотосинтезу та ростових процесів.

У зв'язку з цим важливо враховувати здатність інтродукованих видів адаптуватися до деградованих ґрунтових умов і забезпечувати стабільне зростання в умовах антропогенного навантаження [48]. Види з розвинутою кореневою системою, високою толерантністю до засолення та здатністю ефективно використовувати обмежені водні ресурси мають перевагу в умовах міського середовища.

Крім того, адаптація рослин до урбанізованих ґрунтів тісно пов'язана з їх здатністю підтримувати водний баланс, що є ключовим фактором їх стійкості до посухи та температурного стресу. Порушення водного режиму ґрунту безпосередньо впливає на водний статус рослин, визначаючи рівень їх гідратації, інтенсивність транспірації та загальний фізіологічний стан.

Таким чином, ґрунтові умови міського середовища є одним із визначальних факторів успішності інтродукції деревних видів, а їх урахування є необхідною умовою для формування стійких і ефективних зелених насаджень у межах урбанізованих територій.

Окрему увагу в сучасних дослідженнях приділяють ролі інтродукованих видів у формуванні мікроклімату міських територій, оскільки саме вони часто визначають ефективність функціонування зеленої інфраструктури в умовах урбанізованого середовища. Встановлено, що деякі інтродуковані види демонструють високу ефективність у зниженні температури повітря та підвищенні вологості завдяки розвиненій листовій поверхні та інтенсивній транспірації [49].

Ефективність мікрокліматорегулювального впливу таких видів обумовлюється їх морфофункціональними характеристиками, зокрема щільністю та архітектонікою крони, площею листової поверхні, інтенсивністю газообміну та здатністю підтримувати водний баланс у стресових умовах. Деревя з густою кроною забезпечують ефективне затінення, знижуючи надходження сонячної радіації до підстильної поверхні, тоді як висока транспіраційна активність сприяє охолодженню повітря та підвищенню його вологості.

Крім того, інтродуковані види, що характеризуються високою екологічною пластичністю, здатні зберігати функціональну активність навіть за умов підвищеного температурного навантаження, дефіциту вологи та забруднення повітря. Це дозволяє їм ефективно виконувати мікрокліматорегулювальні функції протягом усього вегетаційного періоду, що є особливо важливим для стабілізації умов міського середовища.

Водночас різні інтродуковані види суттєво відрізняються за рівнем впливу на мікроклімат, що зумовлює необхідність їх диференційованого підбору та наукового обґрунтування використання в системі міського озеленення. Оцінка їх ефективності має базуватися не лише на морфологічних показниках, а й на фізіологічних параметрах, що відображають здатність рослин адаптуватися до змін мікрокліматичних умов.

Таким чином, використання інтродукованих видів дерев є перспективним напрямом формування кліматично адаптивної зеленої інфраструктури, однак потребує комплексного підходу до оцінки їх мікрокліматорегулювального потенціалу з урахуванням морфофункціональних і фізіологічних характеристик.

Разом із тим сучасні дослідження підкреслюють необхідність комплексного підходу до інтродукції, який включає аналіз кліматичних, ґрунтових, біотичних і антропогенних факторів. Ефективність інтродукції визначається не лише екологічними характеристиками виду, але й умовами середовища, в яке він інтегрується, що потребує системного врахування взаємодії різних компонентів урбанізованої екосистеми.

Кліматичні фактори, зокрема температурний режим, вологість повітря та частота екстремальних погодних явищ, визначають межі адаптаційних можливостей рослин. Ґрунтові умови впливають на водний і мінеральний обмін, тоді як біотичні взаємодії, включаючи конкуренцію з аборигенними видами та вплив шкідників і патогенів, можуть визначати успішність закріплення інтродукованих видів у новому середовищі. Антропогенні фактори, такі як забруднення, ущільнення ґрунтів і зміна гідрологічного режиму, додатково ускладнюють процес адаптації.

У практиці сучасного міського озеленення дедалі ширше застосовуються методи моделювання, які дозволяють прогнозувати адаптаційний потенціал нових видів і оцінювати їхній вплив на екосистемні процеси [50]. Використання математичних і комп'ютерних моделей дає змогу аналізувати взаємозв'язки між морфофункціональними характеристиками рослин і параметрами мікроклімату, а також прогнозувати ефективність зелених насаджень у різних умовах міського середовища.

Крім того, моделювання дозволяє оцінювати сценарії розвитку міських екосистем у контексті змін клімату, визначати оптимальні види для озеленення та обґрунтовувати рішення щодо формування зеленої інфраструктури. Це сприяє переходу від емпіричних підходів до науково обґрунтованого планування міського озеленення.

Таким чином, комплексний підхід до інтродукції, заснований на поєднанні польових досліджень і методів моделювання, є необхідною умовою підвищення ефективності використання інтродукованих видів у міських екосистемах і забезпечення їх стійкого функціонування в умовах урбанізації.

Таким чином, аналіз сучасної наукової літератури свідчить, що інтродукція нових видів дерев у міських зелених зонах є складним багатофакторним процесом, який потребує екологічно обґрунтованого підходу та комплексного врахування природних і антропогенних чинників. Ефективність цього процесу визначається взаємодією кліматичних, ґрунтових, біотичних і техногенних факторів, а також морфофункціональними особливостями самих рослин.

Успішна інтродукція сприяє підвищенню екологічної стійкості урбанізованих екосистем, оптимізації мікрокліматичних умов і розширенню функціональних можливостей міської зеленої інфраструктури. Використання інтродукованих видів дозволяє формувати більш адаптивні зелені насадження, здатні ефективно виконувати мікрокліматорегулювальні, санітарно-гігієнічні та рекреаційні функції в умовах зростаючого антропогенного навантаження.

Водночас ефективність інтродукованих видів значною мірою залежить від їх здатності адаптуватися до специфічних умов міського середовища, підтримувати

стабільний фізіологічний стан і зберігати функціональну активність у стресових умовах. Це зумовлює необхідність детального вивчення їх морфологічних і фізіологічних характеристик, а також оцінки їх ролі у формуванні мікрокліматичних параметрів урбанізованих територій.

Разом з тим, незважаючи на значну кількість досліджень, залишаються недостатньо вивченими питання, пов'язані з видоспецифічними особливостями впливу інтродукованих дерев на мікроклімат і механізмами їх адаптації до умов урбанізації. Особливу актуальність має дослідження фізіологічних показників, зокрема водного статусу рослин, як індикатора їх адаптаційного потенціалу та ефективності функціонування в міському середовищі.

Таким чином, подальші дослідження у сфері інтродукції деревних видів мають бути спрямовані на інтеграцію екологічних, мікрокліматичних і фізіологічних підходів з метою обґрунтування оптимальних рішень для формування стійкої та ефективної зеленої інфраструктури міст.

1.4 Методичні підходи до дослідження впливу зелених насаджень на мікроклімат міських територій

У сучасній урбоекології дослідження впливу зелених насаджень на мікроклімат міських територій ґрунтується на комплексному застосуванні теоретичних, польових та аналітичних методів, що дозволяють оцінювати взаємодію рослинності з атмосферними процесами в межах урбанізованого середовища. Такий підхід забезпечує можливість інтегрованого аналізу мікрокліматичних параметрів з урахуванням як біотичних, так і абіотичних чинників.

Необхідність використання багатокомпонентного методичного підходу зумовлена складністю функціонування міських екосистем, які характеризуються значною просторовою неоднорідністю та інтенсивним антропогенним впливом. Урбанізовані території відрізняються специфічними мікрокліматичними умовами, що формуються під впливом щільної забудови, трансформації природних поверхонь, зміни енергетичного балансу та скорочення площ природної рослинності [51; 52].

У зв'язку з цим сучасні дослідження передбачають поєднання польових вимірювань мікрокліматичних параметрів (температури та вологості повітря, температури й вологості ґрунту), дистанційних методів спостереження, а також лабораторних досліджень фізіологічного стану рослин. Польові дослідження дозволяють отримати первинні дані про варіабельність мікрокліматичних показників у підкрановому просторі, враховуючи добову та сезонну динаміку, тоді як лабораторні методи забезпечують оцінку функціонального стану рослин і їх реакції на умови середовища.

Важливим компонентом сучасних урбоекологічних досліджень є застосування аналітичних і статистичних методів, що дозволяють виявляти закономірності формування мікроклімату, оцінювати вплив окремих факторів і їх взаємодію. Використання багатовимірних статистичних підходів забезпечує можливість комплексної інтерпретації отриманих результатів і підвищує достовірність наукових висновків.

Крім того, інтеграція різних методів дослідження дозволяє розглядати зелені насадження як динамічний компонент міських екосистем, що активно взаємодіє з атмосферними процесами, впливаючи на тепловий, водний та радіаційний баланс урбанізованого середовища. Це створює передумови для формування науково обґрунтованих підходів до управління зеленою інфраструктурою та підвищення її ефективності в умовах змін клімату.

Таким чином, комплексний методичний підхід є необхідною умовою для всебічного дослідження мікрокліматорегулювальної ролі зелених насаджень і дозволяє отримати об'єктивні дані щодо їх впливу на функціонування міських екосистем.

У науковій літературі мікроклімат визначають як сукупність атмосферних характеристик, що формуються у приземному шарі повітря в межах обмеженої території під впливом локальних природних та антропогенних факторів. До основних параметрів мікроклімату належать температура повітря, відносна вологість, швидкість і напрямок вітру, радіаційний режим, а також температурно-вологісні

характеристики ґрунту, які в сукупності визначають умови функціонування екосистем і комфортність середовища для людини.

У межах міських досліджень особливу увагу приділяють мікрокліматичним умовам, що формуються безпосередньо в зоні життєдіяльності людини, тобто у нижніх шарах атмосфери на висоті до кількох метрів над поверхнею землі. Саме цей приземний шар є найбільш чутливим до впливу локальних факторів і водночас найбільш значущим з точки зору оцінки екологічної комфортності урбанізованого середовища.

У міських умовах мікроклімат формується під впливом складної взаємодії природних і антропогенних чинників, серед яких провідну роль відіграють щільність і характер забудови, тип підстильної поверхні, наявність і структура зелених насаджень, а також інтенсивність техногенного навантаження. Урбанізоване середовище характеризується значною просторовою неоднорідністю, що зумовлює формування локальних мікрокліматичних відмінностей навіть у межах невеликих територій.

Саме на цьому рівні відбувається взаємодія між рослинністю, підстильною поверхнею та атмосферними процесами, що визначає тепловий, водний та аеродинамічний режим урбанізованих територій [53]. Зелені насадження, змінюючи умови радіаційного обміну, циркуляцію повітря та водний баланс, виступають важливим регулятором мікроклімату, формуючи більш стабільні та сприятливі умови для функціонування міських екосистем.

Таким чином, мікроклімат урбанізованих територій є результатом складної взаємодії природних і антропогенних факторів, а його дослідження потребує комплексного підходу з урахуванням просторової структури міського середовища та особливостей функціонування його окремих компонентів.

У контексті дослідження міського мікроклімату важливим є врахування різних масштабних рівнів кліматичних процесів, оскільки формування кліматичних умов відбувається в результаті взаємодії факторів різного просторового масштабу. У сучасних дослідженнях прийнято виділяти макрокліматичний, мезокліматичний і

мікрокліматичний рівні аналізу, кожен з яких характеризується специфічними особливостями та факторами формування.

Макроклімат характеризує загальні кліматичні умови регіону, які визначаються географічним положенням, циркуляцією атмосфери, рельєфом і глобальними кліматичними процесами. Він формує базові умови існування рослинності та визначає межі можливого видового складу зелених насаджень.

Мезоклімат визначає особливості клімату окремих частин міста, таких як житлові райони, промислові зони, парки або прибережні території. На цьому рівні значний вплив мають щільність і характер забудови, тип підстильної поверхні, наявність зелених масивів і водних об'єктів, що зумовлює формування локальних кліматичних відмінностей у межах міського середовища.

Мікроклімат відображає локальні атмосферні умови на рівні конкретних ділянок міського простору, зокрема підкранового простору дерев, відкритих майданчиків або внутрішніх дворів [54]. Саме на цьому рівні проявляється безпосередній вплив рослинності на параметри середовища, включаючи температуру повітря, відносну вологість, швидкість і напрямок вітру, а також радіаційний баланс.

Саме мікрокліматичний рівень є найбільш чутливим до впливу зелених насаджень, оскільки рослинність здатна істотно змінювати тепловий баланс, вологість повітря, швидкість вітру та радіаційний режим території. Вплив зелених насаджень на цьому рівні має локальний, але водночас надзвичайно важливий характер, оскільки саме він визначає комфортність середовища для людини та умови функціонування міських екосистем.

Таким чином, аналіз мікроклімату з урахуванням різних масштабних рівнів дозволяє більш повно оцінити вплив зелених насаджень на кліматичні умови урбанізованих територій та обґрунтувати ефективні підходи до формування зеленої інфраструктури міста.

У зв'язку з цим сучасні дослідження впливу зелених насаджень на мікроклімат міських територій орієнтовані на аналіз комплексу метеорологічних параметрів, які відображають основні характеристики приземного шару атмосфери та визначають умови функціонування урбанізованого середовища. Серед них ключове значення

мають температура повітря, відносна вологість, швидкість і напрямок вітру, інтенсивність сонячної радіації та температура підстильної поверхні.

Температура повітря є базовим показником теплового стану середовища і визначає рівень теплового навантаження на населення, тоді як відносна вологість характеризує водний режим атмосфери та впливає на процеси тепловіддачі організму людини. Швидкість і напрямок вітру визначають інтенсивність вентиляції міського простору, впливаючи на розсіювання тепла та забруднювальних речовин.

Інтенсивність сонячної радіації та температура поверхонь відображають особливості радіаційного та теплового балансу міських територій. Зниження нагрівання підстилаючої поверхні під впливом зелених насаджень сприяє зменшенню теплового випромінювання та стабілізації температурного режиму в приземному шарі повітря.

Саме ці показники дозволяють оцінити ступінь формування комфортного мікроклімату в межах урбанізованого середовища та визначити ефективність зелених насаджень як природного регулятора кліматичних умов [55]. Їх комплексний аналіз забезпечує можливість виявлення закономірностей впливу рослинності на мікрокліматичні параметри та оцінки її ролі у формуванні екологічно сприятливого середовища.

Крім того, інтеграція зазначених параметрів у єдину систему аналізу дозволяє проводити порівняльну оцінку різних типів зелених насаджень і визначати найбільш ефективні варіанти їх використання для оптимізації мікрокліматичних умов міських територій.

Таким чином, комплексний підхід до оцінки метеорологічних параметрів є необхідною умовою для об'єктивного дослідження мікрокліматорегулювальної ролі зелених насаджень і обґрунтування практичних рекомендацій щодо їх використання в системі міського озеленення.

Одним із найбільш поширених підходів до дослідження мікроклімату міських територій є проведення польових спостережень, які забезпечують отримання первинних емпіричних даних про стан приземного шару атмосфери. Польові дослідження передбачають безпосереднє вимірювання мікрокліматичних параметрів

у різних функціональних зонах міста з використанням спеціалізованого метеорологічного обладнання, що дозволяє враховувати реальні умови урбанізованого середовища.

У межах таких досліджень застосовуються як стаціонарні, так і маршрутні методи спостережень. Стаціонарні вимірювання здійснюються на фіксованих ділянках і дозволяють аналізувати часову динаміку мікрокліматичних показників, включаючи добові та сезонні коливання температури повітря, відносної вологості, швидкості вітру та інших параметрів. Такі дослідження є особливо важливими для виявлення закономірностей функціонування мікроклімату в умовах тривалого впливу різних факторів середовища.

Маршрутні спостереження забезпечують можливість оцінки просторової диференціації мікроклімату в межах різних типів міських ландшафтів [56]. Вони дозволяють порівнювати мікрокліматичні умови в зонах із різною щільністю забудови, різним рівнем озеленення та різними типами підстильної поверхні, що дає змогу виявити локальні особливості формування мікроклімату.

Важливим аспектом польових досліджень є стандартизація умов проведення вимірювань, зокрема висоти розміщення датчиків, часу спостережень і типу використовуваного обладнання, що забезпечує порівнянність отриманих результатів. Крім того, польові спостереження часто поєднуються з фіксацією характеристик рослинності, таких як видова належність, структура крони та ступінь зімкнутості насаджень, що дозволяє встановлювати зв'язок між мікрокліматичними показниками та особливостями зелених насаджень.

Таким чином, польові дослідження є базовим інструментом вивчення мікроклімату міських територій, що забезпечує отримання достовірних даних про вплив зелених насаджень на параметри середовища та створює основу для подальшого аналітичного узагальнення результатів.

Польові дослідження зазвичай проводяться із застосуванням сучасних вимірювальних приладів, серед яких використовуються цифрові термогігрометри, анемометри, пірометри, радіаційні сенсори та автоматичні метеостанції. Використання такого обладнання дозволяє отримувати точні дані про температурний

режим, вологість повітря, швидкість вітру та інші параметри мікроклімату в різних умовах міського середовища. Особливу увагу приділяють порівняльним вимірюванням на відкритих ділянках і в межах зелених насаджень, що дає можливість оцінити ефективність рослинності у зниженні температури повітря та формуванні більш комфортних кліматичних умов [57].

Важливим напрямом сучасних досліджень є використання автоматизованих систем моніторингу мікроклімату, які дозволяють здійснювати довготривалі спостереження та аналізувати сезонні та добові коливання атмосферних параметрів. Такі системи базуються на використанні цифрових логерів і сенсорних мереж, що забезпечують безперервну реєстрацію метеорологічних показників. Застосування автоматизованих систем моніторингу дозволяє накопичувати великі масиви даних і проводити детальний аналіз впливу зелених насаджень на формування мікроклімату в різних часових масштабах [58].

Окрім польових методів дослідження, важливе значення мають геоінформаційні технології та методи дистанційного зондування Землі. Використання супутникових даних дозволяє аналізувати просторові закономірності формування температурного режиму міських територій, визначати зони теплових аномалій і оцінювати вплив зелених насаджень на зменшення ефекту міського теплового острова. У сучасних дослідженнях широко використовуються індекси рослинності, зокрема NDVI, які дозволяють оцінити щільність рослинного покриву та його вплив на мікрокліматичні процеси [59].

Супутникові методи також дозволяють визначати температуру поверхні міських територій за допомогою теплових каналів дистанційного зондування. Аналіз температури поверхні (Land Surface Temperature) дає можливість виявляти закономірності формування теплових островів і оцінювати роль зелених насаджень у їх локальному зниженні. Поєднання супутникових даних із польовими вимірюваннями забезпечує комплексний підхід до дослідження мікроклімату міських територій та дозволяє отримувати більш достовірні результати [60].

Важливим етапом аналізу є застосування статистичних методів обробки отриманих даних. У сучасних дослідженнях широко використовуються методи

кореляційного аналізу, регресійного моделювання, дисперсійного аналізу та багатовимірної статистики. Використання статистичних методів дозволяє встановити взаємозв'язки між параметрами мікроклімату та характеристиками зелених насаджень, такими як площа листкової поверхні, щільність крони, видовий склад та структура рослинності [61].

Застосування багатофакторних статистичних моделей дозволяє оцінювати комплексний вплив різних компонентів міського середовища на мікрокліматичні процеси. Такі моделі враховують взаємодію рослинності з морфологією забудови, характеристиками підстильної поверхні та метеорологічними умовами. У результаті стає можливим визначення ролі окремих елементів міської зеленої інфраструктури у формуванні комфортного мікроклімату та розробка рекомендацій щодо оптимізації структури озеленення міських територій [62].

Таким чином, сучасні методичні підходи до дослідження впливу зелених насаджень на мікроклімат міських територій базуються на поєднанні польових вимірювань, інструментального моніторингу, геоінформаційного аналізу та статистичного моделювання. Комплексне використання цих методів дозволяє отримувати науково обґрунтовані результати щодо ролі рослинності у формуванні мікрокліматичних умов урбанізованого середовища та створює основу для подальших досліджень у сфері оптимізації міської зеленої інфраструктури в умовах кліматичних змін.

1.5 Роль інтродукованої дендрофлори у формуванні мікроклімату міських зелених зон

У сучасних умовах урбанізації та посилення кліматичних змін особливого значення набуває дослідження ролі інтродукованої дендрофлори у формуванні мікроклімату міських зелених зон. Урбанізовані території характеризуються підвищеним тепловим навантаженням, дефіцитом вологи, високим рівнем забруднення та значною трансформацією природних компонентів середовища, що

зумовлює необхідність пошуку ефективних біологічних механізмів регуляції мікроклімату.

Інтродуковані види дерев дедалі ширше використовуються у практиці міського озеленення завдяки їх високій адаптивності до антропогенно трансформованих умов середовища, стійкості до абіотичних стресів і здатності ефективно виконувати екосистемні функції. Вони характеризуються високою екологічною пластичністю, що дозволяє їм зберігати функціональну активність у складних умовах міського середовища, включаючи підвищені температури, дефіцит вологи та забруднення повітря.

У сучасній науковій літературі інтродукція розглядається як складний багатофакторний процес перенесення видів за межі природного ареалу з подальшою адаптацією до нових екологічних умов, що супроводжується змінами у функціонуванні урбоекосистем [63]. Цей процес включає не лише фізіологічну та морфологічну адаптацію рослин, але й їх інтеграцію у нові біотичні взаємодії, що визначає їх роль у структурі та функціонуванні міських екосистем.

Особливу увагу в сучасних дослідженнях приділяють оцінці впливу інтродукованих видів на мікрокліматичні параметри, зокрема температурний і вологісний режими, а також їх здатності формувати локальні мікрокліматичні умови. Завдяки розвиненій листковій поверхні, інтенсивній транспірації та здатності до затінення інтродуковані види можуть істотно впливати на тепловий і водний баланс урбанізованого середовища.

Водночас різні інтродуковані види демонструють неоднакову ефективність у формуванні мікроклімату, що зумовлюється їх морфофункціональними особливостями та рівнем адаптації до умов міського середовища. Це підкреслює необхідність їх комплексного дослідження з урахуванням не лише екологічних, але й фізіологічних характеристик, які визначають їх адаптаційний потенціал.

Таким чином, інтродукована дендрофлора розглядається як важливий компонент кліматично адаптивної зеленої інфраструктури, що здатний підвищувати екологічну стійкість урбанізованих територій і формувати сприятливі мікрокліматичні умови, що обґрунтовує необхідність її поглибленого наукового дослідження.

Сучасні дослідження підтверджують, що інтродуковані види дерев відіграють важливу роль у формуванні мікроклімату міських територій, зокрема у регуляції температурного режиму, вологості повітря, радіаційного балансу та аеродинамічних характеристик середовища. Їх вплив має комплексний характер і реалізується через взаємодію фізіологічних процесів рослин із фізичними параметрами міського середовища.

Завдяки значній листковій поверхні, високій інтенсивності транспірації та здатності формувати розвинені крони вони забезпечують ефективне зниження температури повітря та поверхонь у межах урбанізованого середовища [64; 65]. Транспірація супроводжується поглинанням теплової енергії, що сприяє охолодженню повітря, тоді як затінення підстильної поверхні зменшує її нагрівання та обмежує накопичення тепла штучними матеріалами.

Крім того, інтродуковані види впливають на радіаційний баланс, змінюючи співвідношення поглиненої та відбитої сонячної енергії, а також на аеродинамічний режим, регулюючи швидкість і напрямки повітряних потоків. Це сприяє формуванню більш стабільних мікрокліматичних умов у межах міських територій.

У результаті формуються локальні мікрокліматичні осередки з більш сприятливими умовами, що характеризуються зниженими температурами, підвищеною вологістю повітря та більш стабільним вітровим режимом. Такі осередки відіграють важливу роль у зменшенні теплового навантаження на населення, особливо в умовах екстремальних температур, і сприяють підвищенню комфортності міського середовища.

Водночас ефективність інтродукованих видів у формуванні мікроклімату залежить від їх морфофункціональних характеристик, рівня адаптації до умов урбанізованого середовища та взаємодії з іншими компонентами міської екосистеми, що зумовлює необхідність їх диференційованого використання у системі міського озеленення.

Таким чином, інтродуковані види дерев є важливим інструментом регуляції мікроклімату міських територій, що підтверджує доцільність їх використання для формування кліматично адаптивної зеленої інфраструктури.

Одним із ключових механізмів впливу інтродукованої дендрофлори на мікроклімат є затінення підстильної поверхні, яке суттєво змінює радіаційний та тепловий баланс міського середовища. Крони дерев істотно зменшують надходження прямої сонячної радіації, що знижує нагрівання дорожніх покриттів, ґрунту та фасадів будівель. Це, у свою чергу, обмежує акумуляцію теплової енергії штучними матеріалами та зменшує інтенсивність довгохвильового теплового випромінювання.

У результаті знижується температура підстильної поверхні, що безпосередньо впливає на тепловий режим приземного шару атмосфери. Це сприяє зниженню температури повітря у приземному шарі та пом'якшенню проявів ефекту міського теплового острова [66]. Особливо виражений цей ефект у зонах із щільною забудовою, де відсутність рослинності призводить до значного перегрівання поверхонь.

Сучасні дослідження свідчать, що ефективність охолоджувального ефекту значною мірою визначається морфологічними характеристиками дерев, зокрема густотою крони, індексом листової поверхні та архітектурою рослин [65]. Дерев з високим індексом листової поверхні (LAI) забезпечують більш ефективне екранування сонячної радіації, тоді як складна просторова структура крони сприяє рівномірному розподілу тіні та зменшенню локальних перегрівів.

Крім того, архітектоніка крони визначає характер проникнення сонячного світла в підкроновий простір, що впливає на формування локальних температурних градієнтів. Щільні та багаторушні крони створюють більш стабільні мікрокліматичні умови, тоді як розріджені насадження забезпечують менш виражений охолоджувальний ефект.

Таким чином, затінення підстильної поверхні є одним із провідних механізмів регуляції мікроклімату міського середовища, ефективність якого значною мірою залежить від морфофункціональних характеристик інтродукованих видів дерев та особливостей їх просторової організації.

Важливим чинником формування мікроклімату є транспіраційна активність дерев, яка забезпечує випаровування вологи та охолодження навколишнього середовища. У процесі транспірації вода, що надходить із ґрунту через кореневу

систему, випаровується з поверхні листків через продихи, що супроводжується поглинанням теплової енергії та призводить до зниження температури повітря в приземному шарі атмосфери. Таким чином, транспірація виступає одним із основних механізмів біологічного охолодження урбанізованого середовища.

За даними сучасних досліджень, інтродуковані види, що характеризуються високою транспіраційною здатністю, можуть демонструвати більш виражений охолоджувальний ефект порівняно з деякими аборигенними видами [67]. Це пояснюється їх адаптаційними особливостями, зокрема здатністю підтримувати активні фізіологічні процеси в умовах підвищених температур і водного дефіциту.

Інтенсивність транспірації залежить від низки факторів, серед яких провідне значення мають площа листової поверхні, стан продихового апарату, водозабезпеченість рослин і мікрокліматичні умови середовища. Висока транспіраційна активність сприяє підвищенню вологості повітря та формуванню локальних зон знижених температур, що особливо важливо в умовах теплового стресу.

Водночас здатність рослин підтримувати стабільний рівень транспірації у стресових умовах визначається їх водним статусом і ефективністю регуляції водного обміну. Умови дефіциту вологи можуть призводити до закриття продихів і зниження інтенсивності транспірації, що зменшує охолоджувальний ефект рослинності.

Таким чином, транспіраційна активність інтродукованих видів дерев є важливим фактором регуляції мікроклімату міських територій, а її ефективність безпосередньо пов'язана з фізіологічним станом рослин і їх здатністю адаптуватися до умов урбанізованого середовища.

Суттєвим аспектом є також вплив інтродукованої дендрофлори на вологість повітря, яка є одним із ключових параметрів мікроклімату міських територій. Завдяки процесам транспірації рослинність сприяє підвищенню відносної вологості повітря, що є важливим чинником формування комфортного мікроклімату в умовах літніх хвиль спеки [68]. Під час випаровування води з листової поверхні відбувається насичення приземного шару повітря водяною парою, що знижує дефіцит насичення і сприяє стабілізації мікрокліматичних умов.

Підвищення вологості повітря має важливе значення для зменшення теплового навантаження на населення, оскільки впливає на процеси тепловіддачі організму людини та загальний рівень термічного комфорту. У поєднанні зі зниженням температури повітря це створює більш сприятливі умови для перебування людей у міському середовищі, особливо в періоди екстремально високих температур.

Інтенсивність впливу рослинності на вологість повітря залежить від морфофункціональних характеристик дерев, зокрема площі листової поверхні, інтенсивності транспірації та стану водного забезпечення рослин. Інтродуковані види, що характеризуються високою транспіраційною активністю, здатні формувати локальні мікрокліматичні умови з підвищеною вологістю, що підсилює їх мікрокліматорегулювальну роль.

У цьому контексті інтродуковані види розглядаються як перспективний елемент адаптації міських територій до змін клімату, оскільки вони здатні ефективно регулювати водний баланс урбанізованого середовища та пом'якшувати негативні наслідки теплового стресу. Їх використання сприяє підвищенню кліматичної стійкості міст і формуванню більш комфортного та екологічно збалансованого середовища.

Таким чином, вплив інтродукованої дендрофлори на вологість повітря є важливим компонентом формування мікроклімату міських територій, який тісно пов'язаний із фізіологічними процесами рослин і їх здатністю адаптуватися до умов урбанізованого середовища.

Окрім температурного та вологісного режимів, інтродукована дендрофлора впливає на аеродинамічні характеристики міського середовища. Деревина змінюють структуру повітряних потоків, знижуючи швидкість вітру та зменшуючи турбулентність у приземному шарі атмосфери, що сприяє формуванню більш стабільних мікрокліматичних умов [69]. Водночас залежно від просторової організації насаджень вони можуть покращувати вентиляцію міського простору, що має важливе значення для зниження рівня забруднення повітря.

Важливим чинником ефективності інтродукованих видів у формуванні мікроклімату є їх морфофізіологічні характеристики. До них належать площа

листової поверхні, структура крони, інтенсивність транспірації, сезонна динаміка листя та здатність до фотосинтезу в умовах урбанізованого середовища. Сучасні дослідження показують, що види з більшою листовою поверхнею та щільною кроною забезпечують більш виражений охолоджувальний ефект і сприяють стабілізації температурного режиму [70].

У сучасних наукових роботах значна увага приділяється порівнянню ефективності інтродукованих та аборигенних видів у формуванні мікроклімату міських територій. Результати досліджень свідчать, що інтродуковані види часто демонструють високу адаптивність до урбанізаційних факторів і здатні ефективно виконувати мікрокліматорегулювальні функції в умовах антропогенного навантаження [71]. Водночас їх використання потребує врахування екологічних ризиків, пов'язаних із потенційною інвазивністю та взаємодією з місцевими екосистемами.

Аналіз сучасної наукової літератури свідчить, що роль інтродукованої дендрофлори у формуванні мікроклімату міських територій залишається недостатньо дослідженою, особливо в умовах конкретних урбанізованих територій України. Більшість досліджень виконано в регіонах із відмінними кліматичними умовами, що ускладнює пряме перенесення їх результатів на локальний рівень [72]. У зв'язку з цим актуальним є проведення регіональних досліджень, спрямованих на оцінку мікрокліматичних ефектів інтродукованих видів у межах конкретних міських зелених зон.

Таким чином, інтродукована дендрофлора відіграє важливу роль у формуванні мікроклімату міських зелених зон, забезпечуючи регуляцію температурного режиму, вологості повітря, радіаційного балансу та вітрового режиму. Водночас ефективність її використання залежить від морфофізіологічних особливостей видів, умов середовища та просторової структури насаджень, що визначає необхідність подальших досліджень у цьому напрямі та підтверджує актуальність даної дисертаційної роботи.

2 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Географічне положення та особливості рельєфу

Дослідження особливостей впливу інтродукованої дендрофлори на мікрокліматичні параметри зелених міських зон проводилися в межах міста Дніпро — одного з найбільших промислових і урбанізованих центрів центрально-східної України. Місто розташоване в середній течії річки Дніпро, у межах Придніпровської височини та Придніпровської низовини, що зумовлює різноманітність природних умов і фізико-географічних особливостей території [73, 74].

В адміністративному відношенні м. Дніпро є обласним центром Дніпропетровської області та характеризується значною щільністю забудови, розвиненою транспортною інфраструктурою і високим рівнем антропогенного навантаження на природні компоненти довкілля. За таких умов зелені насадження відіграють важливу роль у стабілізації мікрокліматичних показників і формуванні сприятливого середовища для проживання населення [75, 76].

Безпосереднім об'єктом досліджень є парк імені Тараса Григоровича Шевченка, розташований у центральній частині міста на правому березі річки Дніпро. Географічні координати центральної частини парку становлять приблизно 48°27' пн. ш. та 35°03' сх. д. Площа парку разом із Монастирським островом становить близько 36–40 га, що робить його однією з найбільших і найзначніших зелених зон центральної частини міста.

Просторове положення парку визначається його безпосередньою близькістю до водної поверхні річки Дніпро, а також оточенням щільною міською забудовою і транспортними магістралями. Поєднання водного об'єкта, значних площ зелених насаджень та урбанізованого середовища формує специфічні локальні природні умови, які істотно відрізняються від умов прилеглих забудованих територій.

Територія парку характеризується складною просторовою та ландшафтною структурою, що включає відкриті рекреаційні ділянки, затінені масиви деревно-чагарникової рослинності, прибережні зони та ділянки з різним ступенем

антропогенного впливу. Значна різноманітність деревних насаджень, у тому числі інтродукованих видів, створює сприятливі умови для проведення досліджень з оцінки їх ролі у формуванні локальних мікрокліматичних параметрів у межах великого міста.

Вибір парку імені Т. Г. Шевченка як району досліджень зумовлений його репрезентативністю для умов щільно урбанізованого середовища, значною площею озеленення, різноманітністю дендрофлори та важливою роллю в системі міського зеленого каркасу м. Дніпро.

Будучи одним із ключових компонентів природного середовища, рельєф значною мірою визначає своєрідність міського ландшафту, а також інженерно-геологічні та екологічні умови планування й забудови [73–75]. Рельєф міста вирізняється неоднорідністю та складністю будови.

Сучасний рельєф правобережної та лівобережної частин міста належить відповідно до класів пластово-денудаційних та акумулятивних рівнин. Головною морфологічною ознакою цих рівнин є ярусність їхньої поверхні. Перепад абсолютних висот у межах території сягає 135 м [74].

Придніпровське пластово-денудаційне підвищення (120–185 м) складене породами стратиграфічно повної лесової формації, що залягає на неогенових відкладах. Найбільш підвищені ділянки приурочені до абсолютних висот 170–180 м. Найвища точка становить 187 м (г. Остра). Загалом поверхня підвищення характеризується глибокою (до 120–134 м) та густою (0,8–0,9 км/км) ерозійною розчленованістю. Водорозділи представлені відносно вузькими міжбалковими останцями. У міру віддалення від Дніпра інтенсивність розчленування зменшується.

Незначна прибережна частина території правобережжя міста, розташована в межах Придніпровської низовини, представлена акумулятивною алювіальною рівниною, де виражені різновікові алювіальні тераси. Морфологічно їхня поверхня являє собою рівнини з абсолютними відмітками від 52,4 до 86,0 м.

На південь від гирла Самари Придніпровська лесова рівнина розділяється каньйоноподібною долиною прориву Дніпра на дві складові частини: лівобережну заплавну лесову рівнину та правобережну Сурсько-Дніпровську еродовану лесову рівнину.

У долину Дніпра відкриваються відносно короткі (2,5–4 км) балки: Таромська, Біла, Зелена, Діївська, Сухий Яр, Аптекарська, Рибаківська, Краснополівська, Крутівська. Крутизна схилів сягає 9–18°, іноді 20–25°, а подекуди навіть 55°. Ширина днищ становить 60–350 м. Вітчастого рисунка їм надають вторинні, або вкладені, донні яри.

У долину Дніпра безпосередньо відкривається й більшість первинних, або долинних, ярів. Їхня довжина становить 0,1–1,0 км, проте в окремих випадках вони досягають 1,3–1,5 км.

Долина Дніпра в межах міста має трапецієподібний поперечний профіль із яскраво вираженою правобічною асиметрією, характерною для долин, закладених уздовж розломів. Унаслідок цього правий борт долини Дніпра високий і крутий, розчленований ярково-балковою мережею, тоді як лівий — низький і пологий. Ширина долини Дніпра в межах міста сягає 20 км, а русло займає лише найнижчу, найбільш заглиблену частину долини, його ширина становить 0,7–1,0 км.

Характерною особливістю рельєфу території міста є наявність ярусності, тобто низки геоморфологічних рівнів. До них належать вододільне плато та серія річкових терас.

Після створення Дніпровського водосховища рівень води в межах міста підвищився з 47,5 до 51,4 м. Поверхні низької та частково високої (51–54 м) заплави і надзаплавної тераси були затоплені. У західній частині міста збереглася широка (до 1,5–2,0 км) Діївсько-Сухачівська заплава.

Серед найбільш активних сучасних морфологічних процесів виокремлюються зсувні явища. Найбільшого поширення вони набули вздовж правого борту долини Дніпра. Переважають зсуви фронтального та площинного типу. Більшою мірою вони розвинені на схилах, що зазнають деформацій, підвищення рівня ґрунтових вод і послаблення порід.

Ерозійно-зсувна діяльність значною мірою уражає правобережні схили, зокрема в басейнах Краснополівської, Рибаківської та Встрічної балок. Розвиток цього процесу простежується також у балках Сухий Яр, Таромська, Біла, Зелена,

Аптекарьська та Діївська. В одних випадках зсуви відбуваються по червоно-бурих глинах, в інших — по каолінах.

Суфозійні процеси мають локальний характер поширення. Їх виникнення пов'язане з механічним вимиванням глинистих частинок унаслідок підвищення рівня ґрунтових вод і витоків із підземних комунікацій. Вони проявляються у вигляді невеликих провальних колодязів завглибшки 1,5–2,0 м.

У результаті антропогенної діяльності формуються техногенні форми рельєфу: сплановані поверхні, терасовані схили, виїмки, рови, насипи, дамби, кар'єри та відвали, що мають різні розміри та конфігурацію.

2.2 Геоєкологічні типи місцевості м. Дніпра

Виділення геоєкологічних типів місцевості на геоморфологічній основі доцільно здійснювати з урахуванням палеогеографічних, гідрогеологічних та екологічних ознак, оскільки саме вони визначають особливості функціонування урбанізованих територій [75, 76]. У межах м. Дніпра можна виділити такі основні типи місцевостей.

Заплавно-нижньотерасний тип місцевості. Цей тип об'єднує поверхні заплави (високої і низької) та нижніх терас. Їх об'єднання в один тип місцевості пояснюється природним положенням, плоским рельєфом, близькими абсолютними висотами поверхні (переважно 52–62 м), подібними умовами зволоження та відсутністю просадних ґрунтів. Природні поверхні заплави розташовані на абсолютних відмітках 48–54 м, а поверхні нижніх терас — 55–62 м. У сучасних умовах міста ці різновисотні поверхні часто маскуються намивними та насипними ґрунтами.

У центральній частині міста природні поверхні представлені лише окремими ділянками заплави, поверхні яких штучно підвищені; інші території були затоплені водами Дніпровського водосховища. Лише в західній частині міста збереглися ділянки заплави, що виходять на поверхню та зазнають періодичного підтоплення.

Потужність наливних пісків на поверхні заплави в районі Набережної Перемоги сягає 9–10 м.

На територіях колишніх заправ і частково терас під наливними пісками часто залягають слабкі ґрунти — мулисті відклади давніх стариць, умови залягання і поширення яких мають важливе значення для будівництва. Процеси підтоплення та заболочування в межах цього типу місцевості набули широкого поширення у зв'язку з порушенням природного гідрогеологічного режиму: внаслідок баражного ефекту наливних, щільної забудови прибережних територій, витоків із водонесучих комунікацій та інших форм техногенного впливу.

Середньотерасний тип місцевості. Головним принципом його виділення є гіпсометричне положення. Середньочетвертинний геоморфологічний рівень розташований на висоті 20–30 м над межею рівнем Дніпра і чітко виражений у рельєфі у вигляді ступенів висотності, що відокремлюють його від нижніх терас пологою або слабо нахиленою поверхнею, а іноді досить крутим уступом. На правобережній частині міста цей тип місцевості простягається у вигляді суцільної смуги шириною до 1 км, а на лівобережжі — у вигляді останця трикутної форми довжиною близько 10 км і шириною до 3 км.

Спільною геологічною рисою є відсутність водотривкого шару вище місцевих базисів ерозії, тому ці ділянки є потенційно підтоплюваними. Глибина залягання ґрунтових вод зазвичай становить 5–10 м, за винятком територій, де розміщені промислові підприємства з мокрими виробничими циклами. Скидання значних об'ємів промислових вод у бік Дніпра ускладнюється поширенням практично водонепроникних порід техногенного походження, зокрема металургійних шлаків, що сприяє розвитку процесів підтоплення.

Верхньотерасний тип місцевості. Цей тип об'єднує поверхні і схили верхніх ранньочетвертинних надзаправних терас з абсолютними відмітками 80–100 м. Морфологічно ці тераси не завжди чітко виражені; їх поверхні здебільшого становлять вузькі ступені, нахилені в бік середніх терас. Вони простягаються вздовж правого схилу долини Дніпра та лівого схилу в районі Ігрени. На незабудованих ділянках уступи густо розчленовані ярами.

Однорідність геологічної та гідрогеологічної будови зумовлена наявністю товщ лесових порід потужністю 10–25 м, що залягають на піщаному алювії, який, у свою чергу, лежить на корінних вивітрених кристалічних породах або неогенових відкладах. На цих ділянках нерідко спостерігаються круті схили, зсувні та ерозійні процеси.

Вододільний тип місцевості. Цей тип об'єднує ділянки вододільного плато між долинами Дніпра й Мокрої Сури на правобережжі, Дніпра й Самари на лівобережжі, а також поверхні найвищих і найдавніших терас Дніпра та їх схили. Для цих поверхонь характерний потужний чохол континентальних утворень: лесова товща завтовшки 20–30 м, у підосві якої залягають водотривкі червоно-бурі глини та важкі суглинки.

За природних умов єдиним джерелом зволоження є атмосферні опади. На водотривкому горизонті формується малопотужний водоносний горизонт із глибоким рівнем ґрунтових вод. Водночас цей тип місцевості характеризується потенційною підтоплюваністю за наявності значних витоків із водонесучих комунікацій, що може зумовлювати просадні деформації лесових ґрунтів, зсуви та руйнування будівель і споруд.

Балково-схилувий тип місцевості. До цього типу належать усі балкові урочища й схили річкових долин за межами плейстоценових терас, крутість яких перевищує 5° . Із збільшенням крутизни схилів змінюються й інші природні показники. На верхніх і середніх частинах схилів спостерігається закономірне виклинювання шарів гірських порід, зростає ступінь зволоження, що проявляється у зміні природної рослинності.

У нижніх частинах схилів, де виклинюється шар водотривких суглинків і глин, на денну поверхню виходять ґрунтові води у вигляді джерел. Завдяки цьому днища балок підтоплені, а в багатьох випадках заболочені. Багато ділянок схилів є зсувонебезпечними, а на крутих схилах ярів спостерігаються обвали та осипи. Таким чином, балково-схилувий тип місцевості характеризується повсюдним розвитком схилувих процесів.

2.3 Характеристика кліматичних умов

Клімат району досліджень формується в межах кліматичних умов степової зони України та належить до помірно континентального типу з вираженою сезонністю метеорологічних процесів [73, 74]. Для території характерні спекотне й відносно посушливе літо, помірно холодна зима з нестійким сніговим покривом, а також значні річні й добові амплітуди температури повітря.

Середньорічна температура повітря в м. Дніпро становить близько $+9^{\circ}\text{C}$, найхолоднішим місяцем є січень, а найтеплішим — липень. У літній період можливі тривалі хвилі спеки, коли максимальні денні температури істотно перевищують середні багаторічні значення, що впливає на тепловий режим міського середовища [77].

Річна кількість атмосферних опадів у межах міста є відносно невисокою, причому більша їх частина припадає на теплий період року. Такий режим зволоження зумовлює сезонні коливання вологості повітря і ґрунтів, що є важливим чинником формування мікроклімату зелених насаджень [73, 74].

Вітровий режим м. Дніпро визначається переважанням західних і північно-західних напрямків у холодний період року та східних і південно-східних — у теплий. У межах міської забудови та зелених зон швидкість вітру суттєво знижується внаслідок екрануючого впливу будівель і деревних насаджень. Особливо виражене зменшення швидкості вітру спостерігається в паркових масивах і прибережних зонах [78].

Характерною рисою кліматичних умов сучасного міста є прояви урбанізаційного впливу, зокрема формування ефекту міського теплового острова, який виражається у підвищенні температури повітря в центральних районах порівняно з приміськими територіями [77, 78]. Зелені насадження, особливо великі паркові комплекси, відіграють важливу роль у пом'якшенні цього ефекту шляхом затінення, випаровування вологи та зміни радіаційного балансу поверхні [78].

Таким чином, кліматичні умови м. Дніпро характеризуються поєднанням континентальних рис і вираженого антропогенного впливу, що створює специфічне

тло для формування локальних мікрокліматичних особливостей у межах зелених міських зон. Це зумовлює доцільність дослідження ролі інтродукованої дендрофлори як одного з ключових чинників регуляції мікрокліматичних параметрів у міському середовищі.

2.4 Гідрологічні умови

Гідрологічні умови району досліджень визначаються розташуванням міста Дніпро в середній течії річки Дніпро, яка є однією з найбільших водних артерій Східної Європи та відіграє ключову роль у формуванні природних і мікрокліматичних умов міського середовища [73, 74, 79]. Наявність значної водної поверхні зумовлює специфічний гідрологічний і термічний режим прилеглих територій, зокрема центральної частини міста.

Річка Дніпро в межах м. Дніпро має широку заплаву та водосховищний характер течії, що пов'язано з регулюванням стоку гідротехнічними спорудами. Регульований режим стоку призводить до зменшення сезонних коливань рівня води, однак не усуває повністю впливу гідрологічних процесів на прилеглі території [79].

Важливим елементом гідрологічних умов району досліджень є прибережні зони та острови, зокрема Монастирський острів, який входить до складу парку імені Т. Г. Шевченка. Ці території характеризуються підвищеною вологістю повітря, специфічним ґрунтово-гідрологічним режимом та формуванням локальних мікрокліматичних умов, відмінних від умов внутрішньої міської забудови. Водна поверхня річки сприяє пом'якшенню температурних коливань, особливо в теплий період року, а також впливає на циркуляцію повітряних мас у прибережних ділянках.

Підземні води в межах міста приурочені переважно до алювіальних відкладів долини річки Дніпро та характеризуються порівняно неглибоким заляганням у прибережних районах. У межах паркових зон рівень ґрунтових вод, як правило, є стабільнішим порівняно з інтенсивно забудованими територіями, що створює сприятливі умови для розвитку деревної рослинності та підтримання оптимального водного режиму ґрунтів [79].

Сукупний вплив відкритої водної поверхні, прибережних ґрунтово-гідрологічних умов та зелених насаджень формує специфічне гідрометеорологічне середовище, яке відіграє важливу роль у регуляції мікрокліматичних параметрів. У межах парку імені Т. Г. Шевченка цей вплив проявляється у підвищенні відносної вологості повітря, зменшенні добових коливань температури та формуванні комфортніших умов для рекреаційного використання території.

Таким чином, гідрологічні умови району досліджень є одним із ключових природних чинників, що визначають особливості мікроклімату зелених міських зон та створюють сприятливе тло для прояву мікрокліматотворювальної ролі інтродукованої дендрофлори.

2.5 Міські ґрунти

Ґрунтовий покрив району досліджень сформувався під впливом як природних факторів ґрунтоутворення, так і тривалого антропогенного навантаження, характерного для урбанізованих територій міста Дніпро [73, 80, 81]. У межах міста природні ґрунти зазнали істотної трансформації внаслідок забудови, планувальних робіт, насипання техногенних ґрунтів, зміни гідрологічного режиму та впливу транспортної і рекреаційної діяльності.

У природному стані на території сучасного м. Дніпро переважали чорноземи звичайні та чорноземи південні, сформовані в умовах степової зони. Проте в межах міської забудови ці ґрунти значною мірою втратили свої первинні морфологічні ознаки й функціональні властивості та трансформувалися в різні типи міських ґрунтів — урбаноземи, техноземи та рекультивовані ґрунтові утворення [73, 80, 81].

Для міських ґрунтів характерні порушена профільна будова, неоднорідність гранулометричного складу, наявність включень будівельного сміття, ущільнення та зниження водопроникності. Такі властивості істотно впливають на водний і повітряний режими ґрунту, що, у свою чергу, позначається на умовах росту та розвитку деревних насаджень [80, 81].

Особливістю ґрунтів зелених міських зон є поєднання техногенних і природних горизонтів, що формують специфічні едафічні умови. У межах парку імені Т. Г. Шевченка ґрунти характеризуються кращою аерацією порівняно зі щільно забудованими територіями, вищими показниками вологоутримання та наявністю гумусового горизонту, що частково зберігся або був відновлений у процесі озеленення. Це створює сприятливі умови для розвитку деревно-чагарникової рослинності, у тому числі інтродукованих видів.

Водночас міські ґрунти зазнають впливу забруднення важкими металами, нафтопродуктами та іншими поллютантами, що надходять з атмосферними випадіннями та поверхневим стоком. Рівень такого забруднення, як правило, є просторово неоднорідним і залежить від функціонального призначення території, інтенсивності руху транспорту та щільності рекреаційного навантаження [80, 81].

Таким чином, міські ґрунти району досліджень характеризуються складною будовою та різним ступенем антропогенної трансформації. Їхні фізико-хімічні та водно-повітряні властивості є важливим чинником, що визначає стан і функціонування зелених насаджень та опосередковано впливає на формування мікрокліматичних параметрів у межах міських паркових територій.

2.6 Міська флора і фауна

Біотичні компоненти міського середовища району досліджень сформувалися в умовах тривалого антропогенного впливу та характеризуються поєднанням природних, напівприродних і штучно створених елементів [76, 82, 83]. Міська флора і фауна м. Дніпра відзначаються високим ступенем трансформації, що зумовлено щільною забудовою, фрагментацією природних біотопів, інтенсивною рекреаційною діяльністю та впливом транспортної інфраструктури.

Флора міських зелених зон представлена переважно культурними та інтродукованими видами рослин, які були цілеспрямовано введені в процесі озеленення територій. Водночас у складі рослинного покриву зберігаються

аборигенні види, характерні для степової зони України, а також синантропні та адвентивні рослини [82, 83].

У паркових комплексах, зокрема в парку імені Т. Г. Шевченка, сформувалися багаторусні фітоценози з домінуванням деревних і чагарникових форм, що створюють специфічні мікрокліматичні умови та забезпечують екологічну стабільність території.

Деревна рослинність відіграє провідну роль у структурі міської флори, виконуючи кліматорегулювальні, захисні та рекреаційні функції. Значна частка інтродукованих деревних видів у зелених насадженнях зумовлює підвищену різноманітність фітоценозів, але водночас потребує оцінки їх адаптаційних можливостей та екологічної доцільності використання в умовах урбанізованого середовища [76, 82].

Міська фауна району досліджень представлена переважно видами, адаптованими до життя в антропогенно змінених умовах. Найбільш чисельними є представники орнітофауни, дрібних ссавців, безхребетних та комах, які використовують зелені насадження як місця живлення, гніздування та укриття. Паркові території виконують роль осередків біорізноманіття, забезпечуючи збереження міських популяцій та підтримання трофічних зв'язків у межах міського ландшафту [82, 83].

Фауна зелених зон тісно пов'язана зі структурою рослинного покриву та станом ґрунтового середовища. Різноманітність деревно-чагарникової рослинності сприяє формуванню мозаїчних біотопів, що позитивно впливає на видовий склад і чисельність тварин. У свою чергу, діяльність представників фауни опосередковано впливає на стан рослинного покриву та екологічні функції зелених насаджень.

Таким чином, міська флора і фауна району досліджень є важливими компонентами урбоєкосистеми, які взаємодіють між собою та з абіотичними чинниками середовища. Їх стан і структура визначають екологічну стійкість зелених зон і створюють передумови для прояву мікрокліматоутворювальної ролі інтродукованої дендрофлори в умовах великого міста.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

3.1 Методи польових досліджень

Дослідження проводили у зелених рекреаційних зонах великого промислового міста Дніпро (Україна): Центральному парку культури та відпочинку імені Тараса Шевченка (48°27'40" пн. ш., 35°04'21" сх. д.) та сквері Івана Старова (48°27'27" пн. ш., 35°03'55" сх. д.), які розташовані в центральній частині міста на відстані близько 240 м один від одного. Площа парку разом із Монастирським островом становить близько 45 га, тоді як площа скверу — близько 14 га.

Клімат м. Дніпро формується в межах степової зони України і належить до помірно континентального типу, що характеризується спекотним і посушливим літом та відносно м'якою зимою з нестійким сніговим покривом і періодичними відлигами [73–75]. Середньорічна температура повітря становить близько +8,5 °С, а середньорічна кількість атмосферних опадів — близько 500 мм [74, 75]. Територія належить до зони нестійкого зволоження, для якої характерні тривалі бездощові періоди в літній сезон тривалістю до 20–40 днів [75]. Незважаючи на складні кліматичні умови, місто характеризується значною дендрологічною різноманітністю (понад 330 видів деревних рослин), що пов'язано з історією озеленення та активною інтродукцією видів [76].

Дослідні ділянки у межах парку ім. Т. Г. Шевченка розташовані на плато у верхній частині південного схилу з переходом до вододільної поверхні (ухил близько 3–4°), тоді як ділянки у сквері Івана Старова приурочені до вододільної території з подібними ґрунтово-гідрологічними умовами. Відповідно до класифікації WRB, ґрунти досліджуваних територій представлені Hortic Anthrosols (Siltic, Eutric), які є потенційно придатними для росту деревної та чагарникової рослинності в умовах міського середовища [77].

Об'єктами досліджень були інтродуковані види дерев, поширені у зелених насадженнях степової зони України: *Acer negundo* L., *Acer saccharum* Marshall., *Aesculus hippocastanum* L., *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, *Celtis occidentalis* L.,

Fraxinus pennsylvanica Marshall., *Gleditsia triacanthos* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott, *Ulmus pumila* L., а також менш поширені *Gymnocladus dioica* (L.) K. Koch і *Quercus rubra* L. Номенклатуру видів наведено відповідно до сучасних таксономічних джерел [78]. Для досліджень відбирали по одному модельному екземпляру кожного виду без ознак хвороб і пошкоджень, однієї вікової групи (40–50 років).

Для оцінювання водного статусу листків та пов'язаних із ним мікрокліматичних умов міських дерев у паркових зонах досліджено вісім видів дерев. Для кожного виду в межах паркових ділянок було відібрано кілька індивідуальних дерев, які обстежували повторно протягом трьох дат відбору проб (13 червня, 26 липня та 06 серпня) і впродовж трьох періодів доби (ранок, полудень, вечір) [92].

Кожне дерево розглядалося як окрема одиниця вибірки (TreeID). Під час кожного відбору проб (дата × час доби) відбирали повністю розвинені, здорові листки із зовнішньої частини крони на співставній висоті та з однаковою експозицією. Зразки негайно поміщали в герметичні пакети для мінімізації втрат води до моменту лабораторної обробки.

Мікрокліматичні умови фіксували під час відбору листків, включаючи температуру повітря (°C) та відносну вологість повітря (%). Крім того, поблизу кожного досліджуваного дерева вимірювали температуру ґрунту (°C) та вологість ґрунту за допомогою стандартних польових сенсорів. Зазначені змінні використовували як коваріати для оцінювання їхнього зв'язку з водним статусом листків.

Мікрокліматичні вимірювання під кронами дерев включали визначення температури та відносної вологості повітря, температури й вологості ґрунту. Дослідження проводили протягом вегетаційного періоду (червень–серпень 2023 р.) один раз на тиждень, а також у найспекотніші дні сезону (13.06.2023, 26.07.2023 та 06.08.2023) [92]. Вимірювання здійснювали з 06:00 до 18:00 під кронами дерев у напрямках сторін світу у трьох повтореннях. Відбір листків проводили вранці (06:00–07:00), опівдні (12:00–13:00) і ввечері (17:00–18:00) із середньої частини крони у чотирьох повтореннях [92].

Вологість ґрунту визначали за допомогою приладу МГ-44 (Україна) на глибині 0–10 см, температуру ґрунту у шарі 5–10 см — цифровим термометром ТС-3М (Україна). Температуру та відносну вологість повітря на висоті 1,3 м вимірювали реєстратором температури й вологості HUATO HE-173 (Китай).

Для оцінки водного стану рослин визначали відносний вміст води (Relative Water Content, RWC) і водний дефіцит (Water Deficit, WD) у листках, використовуючи класичний фізіологічний метод висікання дисків листкової пластинки [79, 80]. Визначали масу свіжих (FW), тургорних (TW) і сухих (DW) зразків листків. Показники розраховували за формулами:

$$RWC = \frac{(FW - DW)}{(TW - DW)} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

$$WD = 100 - \left[\frac{(FW - DW)}{(TW - DW)} \cdot 100\% \right] \quad (3.2)$$

Періодичність спостережень становила один раз на тиждень протягом вегетаційного періоду, що дало змогу відстежити динаміку досліджуваних показників та зменшити вплив короточасних метеорологічних коливань. Усі вимірювання здійснювалися в однаковий часовий інтервал доби з метою мінімізації похибок, пов'язаних із добовою амплітудою температури та вологості.

Отримані експериментальні дані надалі використовувалися для статистичної обробки, порівняльного аналізу та встановлення кореляційних зв'язків між видовими характеристиками дерев і параметрами сформованого підкоронового мікроклімату.

3.2 Методи лабораторних досліджень

Водний статус листків оцінювали за допомогою показників Water Content (WC) та Relative Water Content (RWC) [79, 80].

Для кожного зразка листка визначали такі маси:

Свіжа маса (FW) — маса свіжої листкової тканини, виміряна одразу після відбору.

Суха маса (DW) — маса після висушування в сушильній шафі до сталої ваги.

Тургорна маса (TW) — маса після регідратації листкової тканини до повного тургору (наприклад, шляхом витримування листків або черешків у дистильованій воді в темряві протягом відповідного часу), з подальшим акуратним видаленням поверхневої води перед зважуванням [80].

Вміст води розраховували як абсолютну кількість води в листковій тканині. Залежно від потреб представлення результатів, WC також можна виражати на основі свіжої маси або на основі сухої маси (г води на г сухої речовини). Відносний вміст води відображає кількість води в листковій тканині відносно її повністю тургорного стану. RWC враховує відмінності у структурі листків і забезпечує нормалізований показник рівня гідратації [79, 80].

3.3 Методи статистичної обробки даних

Для кількісної оцінки чинників, що впливають на водний статус листків, було побудовано лінійні змішані моделі (LMM) окремо для WC та RWC [81]. Залежну змінну (WC або RWC) моделювали як функцію мікрокліматичних і ґрунтових предикторів (температура повітря, відносна вологість повітря, температура ґрунту, вологість ґрунту), а також категоріальних факторів (дата відбору, час доби та вид). TreeID включали як випадковий перехоплювальний ефект (random intercept) для врахування повторних вимірювань з одного й того ж дерева. Значущість фіксованих ефектів оцінювали за допомогою критеріїв Wald χ^2 типу II [82]. У разі значущого впливу виду проводили попарні post-hoc порівняння між видами з використанням оцінених граничних середніх (estimated marginal means) з поправкою Тьюкі [83]. Результати узагальнювали у вигляді компактного літерного представлення (види, що мають хоча б одну спільну літеру, статистично не відрізняються при $\alpha = 0,05$). Аналіз виконували в середовищі R [84].

Для статистичного аналізу мікрокліматичних умов використано багатовимірний дисперсійний аналіз (MANOVA), який застосовували для оцінки того, чи формуються підкранові мікрокліматичні умови спільно видовою належністю дерев і просторовими характеристиками крони [84]. MANOVA використовували як початковий інструмент скринінгу для перевірки загального впливу кількох категоріальних предикторів на набір корельованих змінних-відгуків з урахуванням їх коваріаційної структури. Модель MANOVA була побудована з використанням функції `manova()` з базового пакета `stats` у середовищі R [84]. Для полегшення інтерпретації на рівні окремих змінних-відгуків з отриманої MANOVA-моделі було вилучено таблиці одновимірного ANOVA за допомогою функції `summary.aov()`. Для кожної змінної-відгуку було обчислено загальний тест моделі шляхом порівняння повної моделі з залишковою варіацією.

Парні кореляційні матриці було розраховано для вологості ґрунту, вологості повітря, температури ґрунту та температури повітря з метою характеристики коваріаційної структури підкранових мікрокліматичних умов. Кореляції обчислювали з використанням коефіцієнта кореляції Пірсона [89]. Загальна кореляційна матриця була отримана для всього набору даних і відображала загальну структуру кореляцій мікрокліматичних змінних для всіх спостережень. Надалі для кожного виду дерев окремо були обчислені видоспецифічні кореляційні матриці. Відхилення визначали шляхом віднімання загальної кореляційної матриці від кожної видоспецифічної матриці, що дозволило виявити видові модифікації структури мікрокліматичних кореляцій. Ці матриці було візуалізовано у вигляді теплових карт із використанням пакета `pheatmap` [86].

Глобальну несхожість між кореляційними матрицями кількісно оцінювали за допомогою ріманової відстані, розрахованої з використанням матричних операцій квадратного кореня та логарифма матриці, реалізованих у пакеті `exrpt` [87]. Статистичну значущість відмінностей у кореляційній структурі між парами груп (загальна вибірка vs окремі види; вид vs вид) оцінювали за допомогою тесту `CovCorTest`, який надає тестову статистику (T) та відповідні р-значення для нульової гіпотези про рівність кореляційних матриць [88]. Кореляційні та девіаційні матриці

було візуалізовано у вигляді анотованих теплових карт із використанням пакета `pheatmap` [86].

Структури кореляцій мікрокліматичних змінних були узагальнені за допомогою матриць кореляції Пірсона, обчислених для всього набору даних і для попередньо визначених груп (вид дерев, експозиція крони та положення в кроні) [89]. Несхожість між кореляційними матрицями кількісно оцінювали за допомогою афінно-інваріантної ріманової відстані на многовиді симетричних додатно визначених матриць [87, 89]. Отриману матрицю відстаней було проєктовано у двовимірний простір із використанням класичного багатовимірного шкалювання (функція `cmdscale`, пакет `stats`) [84]. Опорну точку, яка представляє середнє Фреше (Карчера) кореляційних матриць, було обчислено як рімановий барицентр, що мінімізує суму квадратів відстаней до всіх групових матриць [87, 89].

Редундантний аналіз (RDA) було застосовано для кількісної оцінки та візуалізації багатовимірних взаємозв'язків між фоновими мікрокліматичними предикторами (вологість ґрунту, вологість повітря, освітленість, температура ґрунту, температура повітря) та підкроновими мікрокліматичними змінними-відгуками (вологість ґрунту, вологість повітря, освітленість, температура ґрунту, температура листка, температура повітря) [85, 89, 91]. Перед аналізом усі змінні було стандартизовано до нульового середнього значення та одиничної дисперсії. RDA-модель була побудована з використанням пакета `vegan` у середовищі R [84, 85], а статистичну значущість загальної моделі, канонічних осей і окремих предикторів оцінювали за допомогою пермутаційних тестів (`anova.cca`, 999 пермутацій) [85, 89]. Значення бі-плотів для предикторів і змінних-відгуків було вилучено та відображено у вигляді векторів, орієнтація та довжина яких відображають напрям і силу багатовимірних асоціацій у канонічному просторі.

Розподіл варіації застосовували для кількісної оцінки відносного та спільного внеску фонового мікроклімату, видової належності дерев і дати відбору проб у багатовимірну варіацію підкронових мікрокліматичних умов. Аналіз проводився в межах підходу RDA з використанням функції `varpart` пакета `vegan` [85, 90]. Скориговані коефіцієнти детермінації (R^2_{adj}) використовували для оцінки

унікальних і спільних часток поясненої варіації, що припадають на кожен набір предикторів, тоді як непояснена частка розглядалася як залишкова варіація [90].

Статистичну обробку отриманих результатів виконували з використанням середовища R [84], застосовуючи методи описової статистики та порівняльного аналізу.

РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ВИДОВОЇ НАЛЕЖНОСТІ, ЕКСПОЗИЦІЇ КРОНИ ТА ПОЛОЖЕННЯ КРОНИ НА МІКРОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ

У даному розділі проаналізовано особливості формування мікрокліматичних умов у підкрановому просторі інтродукованих деревних видів залежно від їх видової належності, експозиції та просторового положення в межах крони. Основну увагу приділено дослідженню температурного та вологісного режимів ґрунту і приземного шару повітря як ключових компонентів мікроклімату міських паркових екосистем.

Отримані результати дозволяють комплексно оцінити роль інтродукованої дендрофлори у формуванні локального мікроклімату та виявити закономірності варіабельності досліджуваних параметрів залежно від біотичних і абіотичних чинників.

Глобальна модель у межах MANOVA виявила високодостовірний загальний вплив пояснювальних факторів (вид, експозиція крони та положення крони) на всі чотири залежні змінні мікросередовища (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Загальні тести моделі (Model vs Residuals) для чотирьох змінних мікросередовища на основі одновимірних тестів MANOVA-моделі з використанням видової належності, експозиції крони (кардинальні напрямки: Пн, Сх, Пд, Зх) та положення крони як предикторів. Для кожної залежної змінної наведено F-критерій, рівень значущості (P) та коефіцієнт детермінації (R^2). $N = 3420$ спостережень.

Залежна змінна	DF моделі	DF залишків	F-критерій	Рівень значущості (P)	R^2
Вологість ґрунту	3,419	3,300	5,477	< 0,001	0,824
Вологість повітря	3,419	3,300	4,693	< 0,001	0,794
Температура ґрунту	3,419	3,300	4,931	< 0,001	0,804
Температура повітря	3,419	3,300	3,868	< 0,001	0,750

Для кожної залежної змінної загальна модель була статистично значущою (усі $P < 0,001$), що свідчить про те, що сукупність предикторів пояснює значну частку варіації мікрокліматичних умов під кроною дерев [93, 94]. Найкращу відповідність моделі було встановлено для вологості ґрунту ($F = 5,48$) з найвищим коефіцієнтом детермінації ($R^2 = 0,824$), що свідчить про особливо сильний вплив просторової та біологічної структури крони на формування умов зволоження ґрунту [95–97]. Подібно високу пояснювальну здатність було отримано для температури ґрунту ($R^2 = 0,804$) та вологості повітря ($R^2 = 0,794$), що вказує на стабільний і суттєвий вплив досліджуваних факторів як на підземні, так і на атмосферні волого-теплові компоненти мікросередовища. Температура повітря характеризувалася найнижчою, хоча все ще значною, часткою поясненої варіації ($R^2 = 0,750$), що може свідчити про відносно більший вплив зовнішніх або неврахованих факторів на температурний режим повітря в підкрановому просторі. Загальна модель температури повітря залишалася високодостовірною ($F = 3,87$, $P < 0,001$), підтверджуючи, що видова належність, експозиція крони та вертикальне положення крони спільно формують її варіабельність. Багатовимірна модель дозволила пояснити значну частку варіабельності всіх досліджуваних мікрокліматичних характеристик (75–82%), що забезпечує статистично надійну основу для подальшого розкладання ефектів та аналізу взаємодій, представлених у таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Таблиці дисперсійного аналізу (ANOVA) для фіксованих ефектів (для кожної залежної змінної), отримані на основі MANOVA. Для кожного фактора в межах кожної залежної змінної наведено ступені свободи (Df), F-критерій та рівень статистичної значущості (P).

Залежна змінна	Фактор	Ступені свободи (Df)	F-критерій	Рівень значущості (P)
Вологість ґрунту	Дата	18	769.819	< 0.001
	Вид	4	87.162	< 0.001
	Сектор (експозиція крони)	3	9.550	< 0.001
	Положення крони	2	92.056	< 0.001
	Дата × Вид	72	13.019	< 0.001
	Вид × Сектор	12	2.438	0.004
	Вид × Положення крони	8	5.309	< 0.001
	Залишки	3300	-	-
Вологість повітря	Дата	18	615.548	< 0.001
	Вид	4	110.578	< 0.001
	Сектор (експозиція крони)	3	9.189	< 0.001
	Положення крони	2	1.608	0.200
	Дата × Вид	72	15.210	< 0.001
	Вид × Сектор	12	7.456	< 0.001
	Вид × Положення крони	8	0.891	0.523
	Залишки	3300	-	-
Температура ґрунту	Дата	18	643.855	< 0.001
	Вид	4	74.811	< 0.001
	Сектор (експозиція крони)	3	27.128	< 0.001
	Положення крони	2	129.554	< 0.001
	Дата × Вид	72	16.835	< 0.001
	Вид × Сектор	12	5.994	< 0.001
	Залишки	3300	-	-

	Вид × Положення крони	8	5.578	< 0.001
	Залишки	3300	-	-
Температура повітря	Дата	18	492.434	< 0.001
	Вид	4	36.374	< 0.001
	Сектор (експозиція крони)	3	7.214	< 0.001
	Положення крони	2	3.272	0.038
	Дата × Вид	72	11.553	< 0.001
	Вид × Сектор	12	3.802	< 0.001
	Вид × Положення крони	8	1.394	0.194
	Залишки	3300	-	-

4.1 Формування температурного режиму ґрунту в підкроновому просторі

Аналіз сезонної динаміки температури ґрунту під кронами п'яти видів дерев свідчить про домінування часової компоненти як основного джерела варіації температурного режиму (табл. 4.2). Дата відбору проб є статистично найсильнішим предиктором температури ґрунту ($F = 643,855$, $P < 0,001$), що відображає виражену сезонність із підвищенням значень у літній період та їх зниженням наприкінці сезону (рис. 4.1).

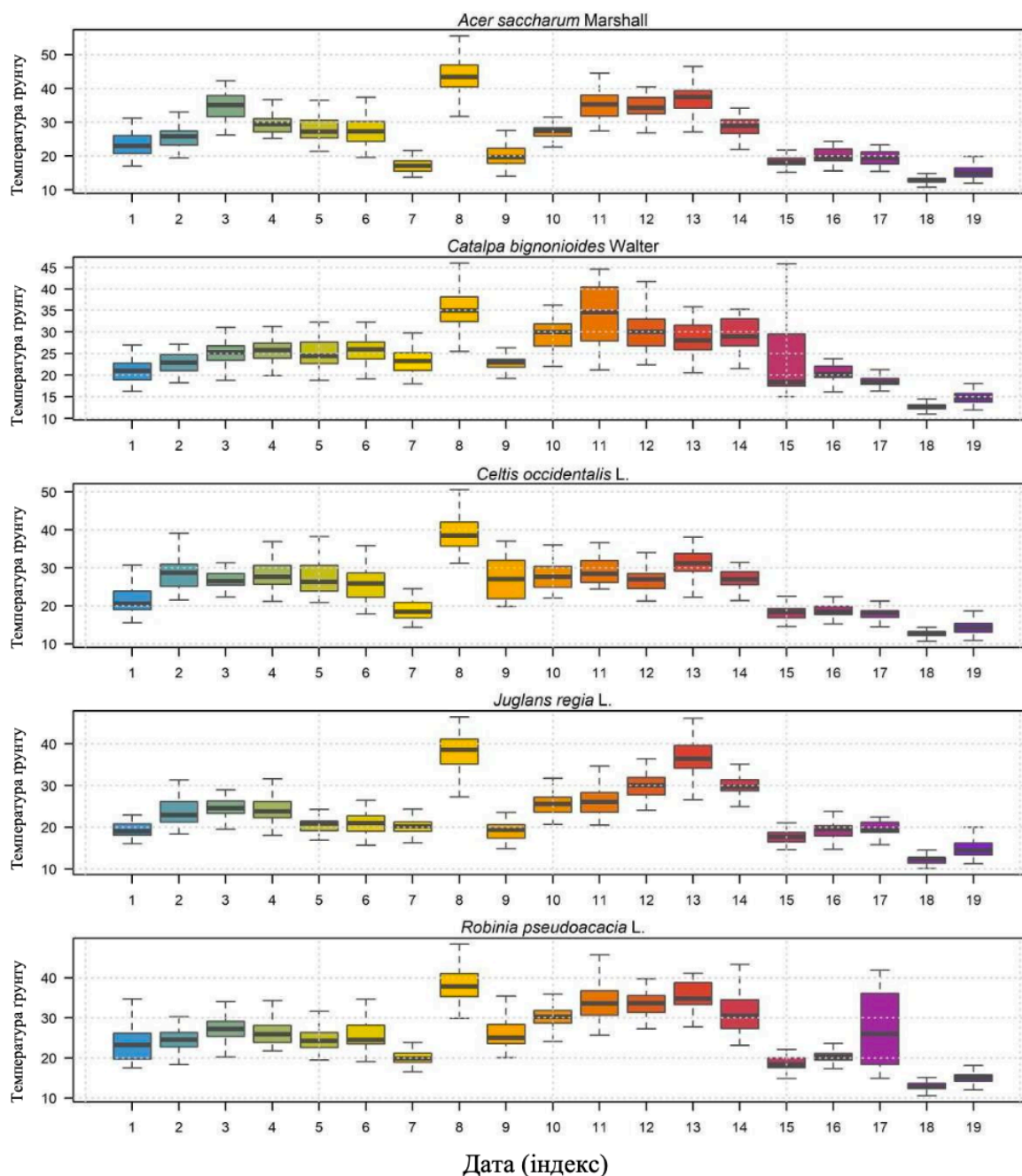


Рисунок 4.1 - Сезонна динаміка температури ґрунту під кронами дерев протягом року. По осі X наведено дати відбору проб у вигляді індексів: 1 — 22.05.2025; 2 — 30.05.2025; 3 — 05.06.2025; 4 — 13.06.2025; 5 — 20.06.2025; 6 — 25.06.2025; 7 — 03.07.2025; 8 — 11.07.2025; 9 — 21.07.2025; 10 — 31.07.2025; 11 — 08.08.2025; 12 — 15.08.2025; 13 — 22.08.2025; 14 — 29.08.2025; 15 — 05.09.2025; 16 — 12.09.2025; 17 — 19.09.2025; 18 — 26.09.2025; 19 — 03.10.2025. Центральна лінія позначає медіану, прямокутники відображають міжквартильний розмах (25-й–75-й процентилі), а «вуса» простягаються до 1,5× міжквартильного розмаху. Викиди не відображені. Кольори використовуються для розрізнення дат відбору проб.

Окрім загальної сезонної тенденції, було виявлено значну диференціацію температури ґрунту між видами ($F = 74,811$, $P < 0,001$), а також систематичні відмінності, пов'язані з експозицією крони ($F = 27,128$, $P < 0,001$) та положенням крони ($F = 129,554$, $P < 0,001$), що свідчить про одночасний вплив видоспецифічних і просторових механізмів на формування мікрокліматичних умов.

Важливо, що сезонні траєкторії змін температури ґрунту відрізняються між видами: значуща взаємодія Дата $\times$ Вид ($F = 16,835$, $P < 0,001$) підтверджує, що форма та/або амплітуда сезонних змін залежать від видової належності. Крім того, значущі взаємодії Вид $\times$ Експозиція ($F = 5,994$, $P < 0,001$) та Вид $\times$ Положення крони ($F = 5,578$, $P < 0,001$) свідчать про те, що вплив орієнтації та вертикального положення є контекстно-залежним і модулюється видоспецифічними особливостями, а не підпорядковується універсальній закономірності, спільній для всіх дерев.

Сезонна динаміка температури ґрунту під кронами дерев характеризується вираженим часовим градієнтом, із підвищенням температури в літній період та її зниженням наприкінці вегетаційного сезону (рис. 4.1). Дата відбору проб є домінуючим фактором, що визначає варіацію температури ґрунту, і пояснює найбільшу частку загальної мінливості цього показника ($F = 643,855$, $P < 0,001$) (табл. 4.2).

Окрім сезонної компоненти, було виявлено статистично значущі відмінності температури ґрунту між видами дерев ($F = 74,811$, $P < 0,001$), що свідчить про наявність видоспецифічних особливостей у формуванні мікрокліматичних умов під кронами. Крім того, температура ґрунту суттєво варіює залежно від експозиції крони ($F = 27,128$, $P < 0,001$) та вертикального положення в межах крони ($F = 129,554$, $P < 0,001$), що підкреслює важливу роль просторової структури крони в регулюванні температурного режиму ґрунту.

Сезонні траєкторії температури ґрунту також відрізняються між видами, що підтверджується значущою взаємодією Дата $\times$ Вид ($F = 16,835$, $P < 0,001$). Отже, форма та амплітуда сезонних змін температури ґрунту є видоспецифічними. Вплив експозиції крони та вертикального положення є контекстно-залежним і модулюється

видовими особливостями, що підтверджується значущими взаємодіями Вид $\times$ Експозиція ($F = 5,994$, $P < 0,001$) та Вид $\times$ Положення крони ($F = 5,578$, $P < 0,001$).

Таким чином, просторове структурування температури ґрунту під кронами дерев не є однаковим для всіх видів і відображає складну взаємодію сезонних, видових і морфологічних факторів.

4.2 Формування режиму вологості ґрунту в підкроновому просторі

Сезонна динаміка вологості ґрунту під кронами дерев характеризується вираженою часовою мінливістю, що свідчить про домінуючу роль сезонного фактору у формуванні гідрологічного режиму ґрунту. Дата відбору проб є статистично найсильнішим фактором, який визначає варіацію вологості ґрунту ($F = 769,819$, $P < 0,001$), пояснюючи найбільшу частку загальної мінливості цього показника. Окрім часової компоненти, було встановлено статистично значущі відмінності вологості ґрунту між видами дерев ($F = 87,162$, $P < 0,001$), що свідчить про важливу роль видоспецифічних особливостей у регулюванні водного режиму підкронового простору. Також було виявлено значущий вплив експозиції крони ($F = 9,550$, $P < 0,001$) та вертикального положення в межах крони ($F = 92,056$, $P < 0,001$), що підтверджує важливість просторової структури крони у формуванні умов зволоження ґрунту (рис. 4.2).

Сезонні траєкторії вологості ґрунту відрізнялися між видами, що підтверджується значущою взаємодією Дата $\times$ Вид ($F = 13,019$, $P < 0,001$), яка свідчить про видоспецифічний характер сезонних змін. Крім того, значущі взаємодії Вид $\times$ Експозиція ($F = 2,438$, $P = 0,004$) та Вид $\times$ Положення крони ($F = 5,309$, $P < 0,001$) підтверджують, що вплив просторових факторів залежить від видових морфологічних та функціональних особливостей дерев. Таким чином, просторово-часова структура вологості ґрунту під кронами дерев формується внаслідок складної взаємодії сезонних змін, видових характеристик та архітекτονіки крони.

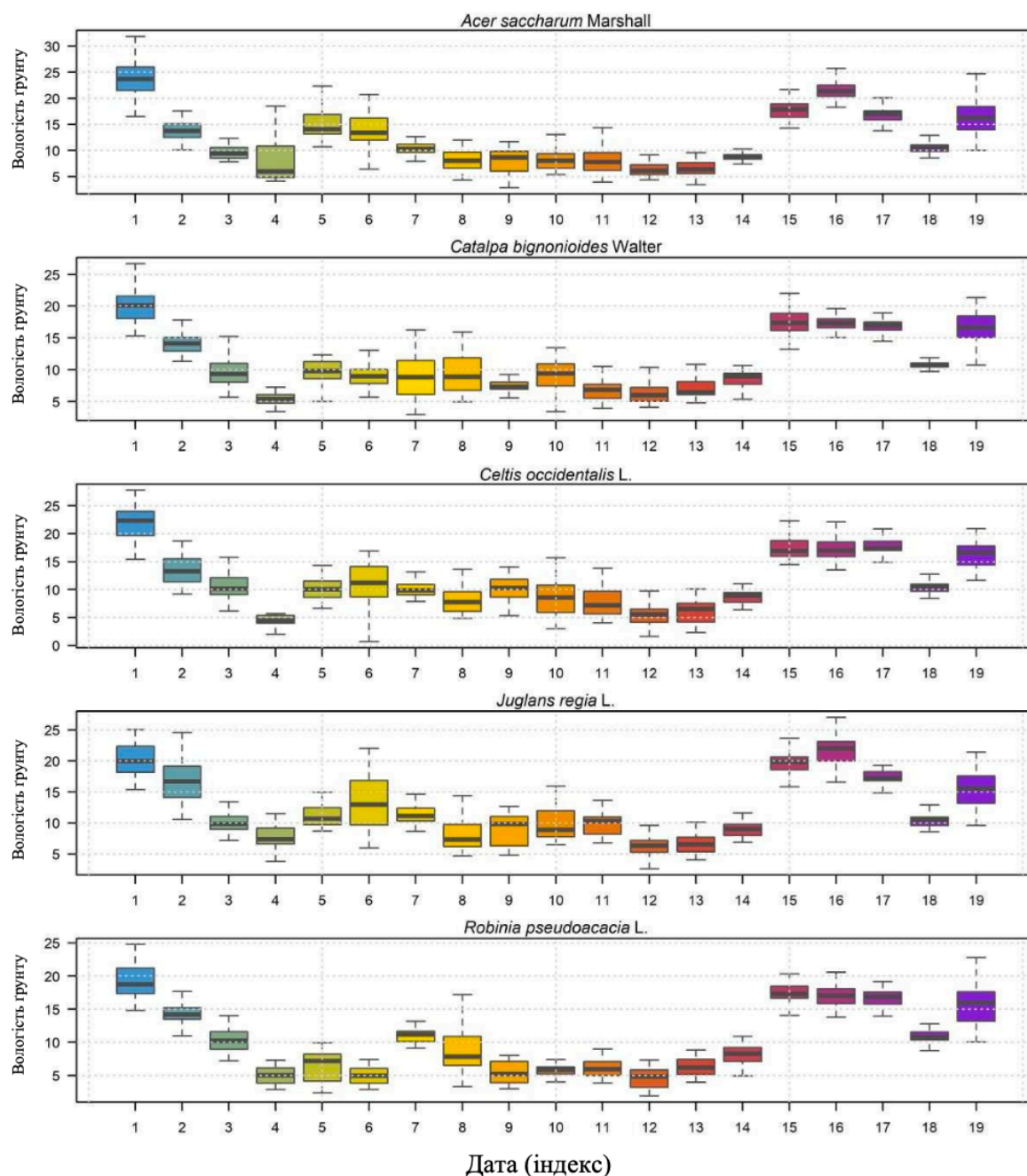


Рисунок 4.2 - Сезонна динаміка вологості ґрунту під кронами дерев протягом року. По осі X наведено дати відбору проб у вигляді індексів: 1 — 22.05.2025; 2 — 30.05.2025; 3 — 05.06.2025; 4 — 13.06.2025; 5 — 20.06.2025; 6 — 25.06.2025; 7 — 03.07.2025; 8 — 11.07.2025; 9 — 21.07.2025; 10 — 31.07.2025; 11 — 08.08.2025; 12 — 15.08.2025; 13 — 22.08.2025; 14 — 29.08.2025; 15 — 05.09.2025; 16 — 12.09.2025; 17 — 19.09.2025; 18 — 26.09.2025; 19 — 03.10.2025. Центральна лінія позначає медіану, прямокутники відображають міжквартильний розмах (25-й–75-й процентилі), а «вуса» простягаються до 1,5× міжквартильного розмаху. Викиди не відображені. Кольори використовуються для розрізнення дат відбору проб.

4.3 Формування температурного режиму приземного шару повітря

Сезонна динаміка температури повітря під кронами дерев характеризується вираженим часовим градієнтом, із вищими значеннями в літній період та поступовим зниженням наприкінці вегетаційного сезону (рис. 4.3). Дата відбору проб є домінуючим фактором, що контролює варіацію температури повітря ($F = 492,434$, $P < 0,001$), пояснюючи найбільшу частку загальної мінливості цього показника (табл. 4.2).

Окрім часової компоненти, було виявлено статистично значущі відмінності температури повітря між видами дерев ($F = 36,374$, $P < 0,001$), що свідчить про видоспецифічну модифікацію температурних умов у підкроновому просторі. Температура повітря також систематично змінювалася залежно від експозиції крони ($F = 7,214$, $P < 0,001$) і, меншою мірою, від вертикального положення в межах крони ($F = 3,272$, $P = 0,038$).

Сезонні траєкторії температури повітря відрізнялися між видами, що підтверджується значущою взаємодією Дата $\times$ Вид ($F = 11,553$, $P < 0,001$), демонструючи, що як час настання, так і амплітуда сезонних температурних змін варіюють залежно від виду. Вплив експозиції крони також відрізнявся між видами, що підтверджується значущою взаємодією Вид $\times$ Сектор ($F = 3,802$, $P < 0,001$).

Водночас взаємодія Вид $\times$ Положення крони не була статистично значущою ($F = 1,394$, $P = 0,194$), що свідчить про відносну сталість вертикальної диференціації температури повітря в межах крони для різних видів дерев.

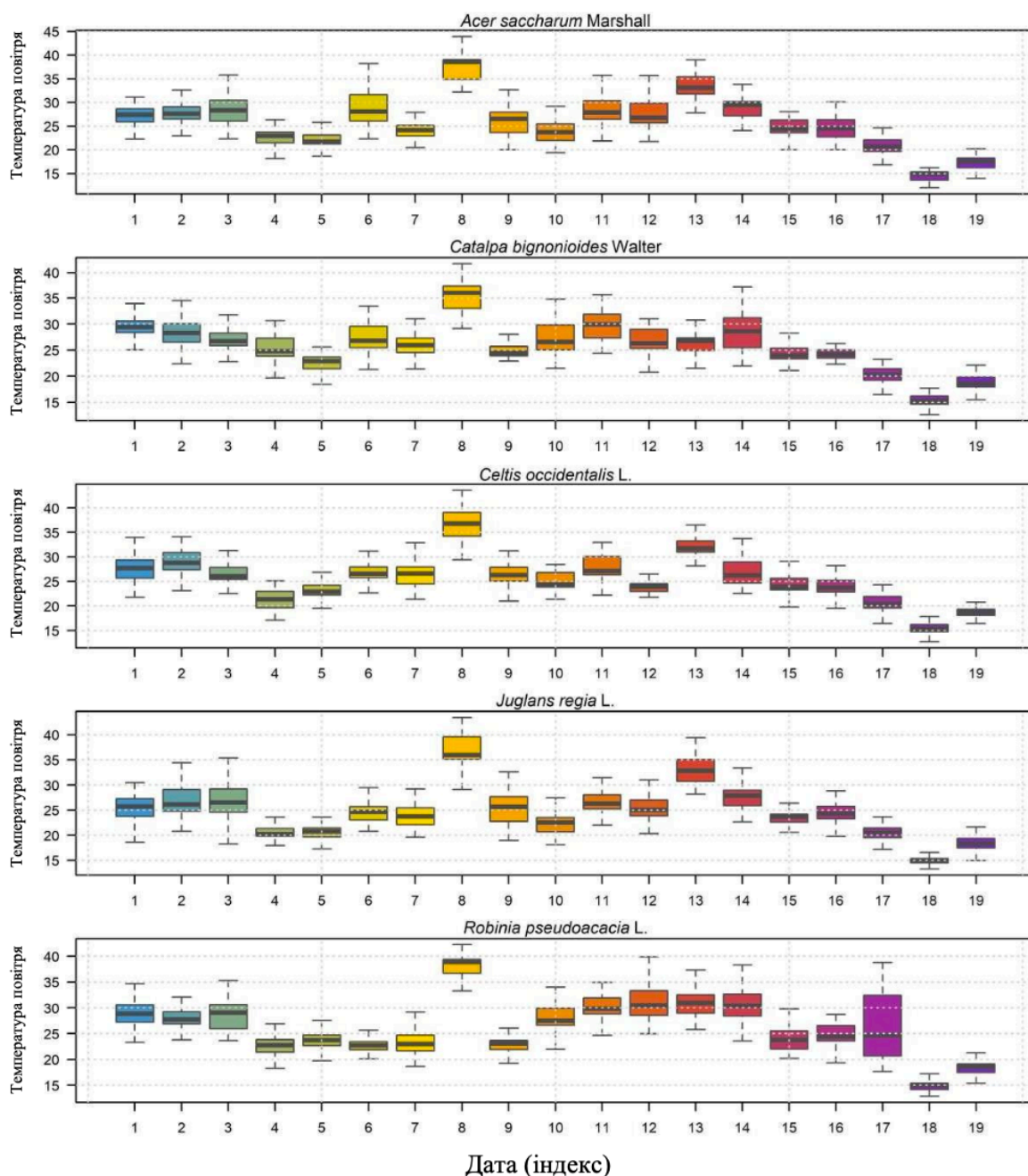


Рисунок 4.3 - Сезонна динаміка температури повітря під кроною дерев протягом року. Вісь x відображає дати відбору проб, пронумеровані таким чином: 1 — 22.05.2025; 2 — 30.05.2025; 3 — 05.06.2025; 4 — 13.06.2025; 5 — 20.06.2025; 6 — 25.06.2025; 7 — 03.07.2025; 8 — 11.07.2025; 9 — 21.07.2025; 10 — 31.07.2025; 11 — 08.08.2025; 12 — 15.08.2025; 13 — 22.08.2025; 14 — 29.08.2025; 15 — 05.09.2025; 16 — 12.09.2025; 17 — 19.09.2025; 18 — 26.09.2025; 19 — 03.10.2025. Центральна лінія позначає медіану, прямокутники відображають міжквартильний інтервал (25–75-ті перцентилі), а «вуса» простягаються до $1,5\times$ міжквартильного розмаху. Викиди не показано. Кольори відповідають датам відбору проб.

4.4 Формування вологості повітря в підкрановому просторі

Сезонна динаміка вологості повітря під кронами дерев характеризується вираженою часовою організацією (рис. 4.4), при цьому дата відбору проб є статистично найсильнішим предиктором цієї змінної ($F = 615,548$, $P < 0,001$) (табл. 4.2).

Окрім часової компоненти, було виявлено значущі відмінності вологості повітря між видами дерев ($F = 110,578$, $P < 0,001$), що свідчить про важливу роль видоспецифічних особливостей у формуванні умов під кронами. Також було встановлено систематичні відмінності, пов'язані з експозицією крони ($F = 9,189$, $P < 0,001$), тоді як основний ефект вертикального положення в межах крони не був статистично значущим ($F = 1,608$, $P = 0,200$).

Сезонні траєкторії вологості повітря суттєво відрізнялися між видами, що підтверджується значущою взаємодією Дата $\times$ Вид ($F = 15,210$, $P < 0,001$). Вплив експозиції крони також змінювався залежно від виду, про що свідчить значуща взаємодія Вид $\times$ Експозиція ($F = 7,456$, $P < 0,001$). Натомість взаємодія Вид $\times$ Положення крони не була статистично значущою ($F = 0,891$, $P = 0,523$), що узгоджується з відсутністю значущого основного впливу положення крони на вологість повітря.

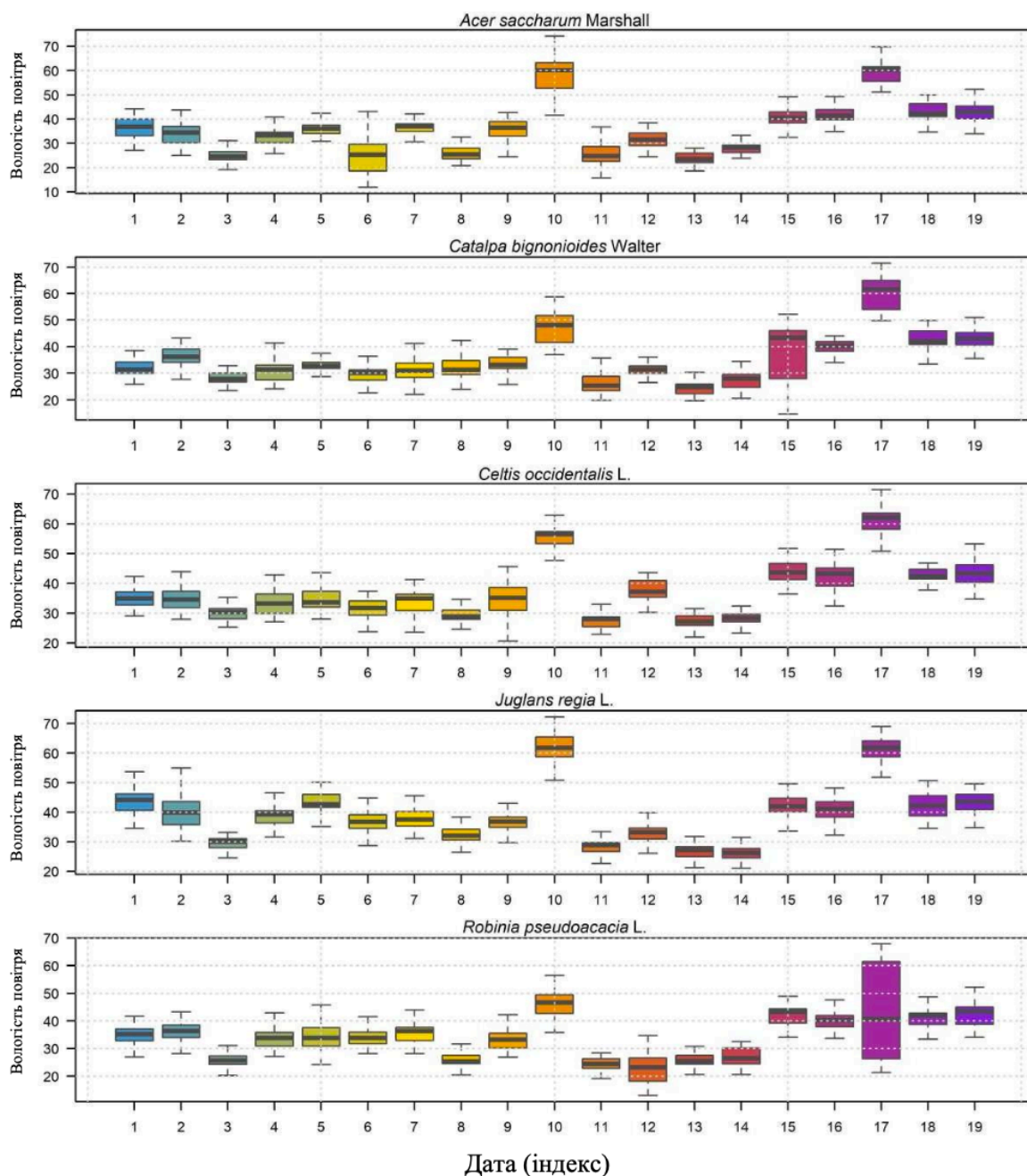


Рисунок 4.4 - Сезонна динаміка вологості повітря під кроною дерев протягом року. Вісь x відображає дати відбору проб, пронумеровані таким чином: 1 — 22.05.2025; 2 — 30.05.2025; 3 — 05.06.2025; 4 — 13.06.2025; 5 — 20.06.2025; 6 — 25.06.2025; 7 — 03.07.2025; 8 — 11.07.2025; 9 — 21.07.2025; 10 — 31.07.2025; 11 — 08.08.2025; 12 — 15.08.2025; 13 — 22.08.2025; 14 — 29.08.2025; 15 — 05.09.2025; 16 — 12.09.2025; 17 — 19.09.2025; 18 — 26.09.2025; 19 — 03.10.2025. Центральна лінія позначає медіану, прямокутники відображають міжквартильний інтервал (25–75-ті перцентилі), а «вуса» простягаються до $1,5 \times$ міжквартильного розмаху. Викиди не показано. Кольори відповідають датам відбору проб.

4.5 Узагальнення впливу факторів на мікрокліматичні параметри

Загальна кореляційна структура виявила два домінуючі та протилежні блоки мікросередовищних параметрів (рис. 4.5). Вологість ґрунту та вологість повітря позитивно корелюють між собою, формуючи кластер показників, пов'язаних із вологістю, тоді як температура ґрунту та температура повітря тісно і позитивно взаємопов'язані, утворюючи температурний кластер. Натомість показники, пов'язані з вологістю, демонструють стійкі негативні кореляції як із температурою ґрунту, так і з температурою повітря, що свідчить про обернену залежність між рівнем зволоження та температурними умовами. Найсильніші позитивні зв'язки спостерігалися між температурою ґрунту та температурою повітря, тоді як найбільш виражені негативні кореляції встановлено між вологістю ґрунту та температурою ґрунту. Кореляційна матриця відображає чіткий компроміс між вологістю та температурою, який структурує мікрокліматичне середовище.

Кореляційні матриці суттєво відрізнялися між п'ятьма видами дерев (CovCorTest, гіпотеза рівності кореляцій відхилена; статистика = 4,53; bootstrap $P < 0,001$; $B = 2000$), що свідчить про видоспецифічний характер взаємозв'язків між змінними мікросередовища. Парні порівняння також виявили значні та нерівномірні відхилення кореляційних структур окремих видів від загальної моделі. Найбільші відхилення від загальної кореляційної матриці спостерігалися для *Robinia pseudoacacia* (ріменівська відстань = 0,455; $|\Delta r| = 0,057$; $P = 0,002$), далі — для *Acer saccharum* (ріменівська відстань = 0,296; $|\Delta r| = 0,048$; $P = 0,009$) та *Celtis occidentalis* (ріменівська відстань = 0,312; $|\Delta r| = 0,053$; $P = 0,027$).

Натомість кореляційна структура для *Catalpa bignonioides* не відрізнялася статистично значуще від загальної моделі ($P = 0,168$), що свідчить про більшу відповідність середньому характеру взаємозв'язків у мікросередовищі. Порівняння між видами продемонстрували значну неоднорідність кореляційних структур. Найбільші парні відмінності були пов'язані з *Robinia pseudoacacia*, особливо у порівняннях із *Celtis occidentalis* (ріменівська відстань = 0,695; $|\Delta r| = 0,108$; $P < 0,001$) та *Juglans regia* (ріменівська відстань = 0,496; $|\Delta r| = 0,074$; $P < 0,001$). Найменші та

статистично незначущі відмінності були встановлені між *Catalpa bignonioides* та *Celtis occidentalis* (ріменівська відстань = 0,222; $|\Delta r| = 0,037$; $P = 0,459$), що свідчить про подібну організацію взаємозв'язків мікросередовища у цих видів.

Отримані результати демонструють, що хоча загальна система характеризується типовим компромісом між вологістю та температурою, окремі види дерев суттєво модулюють силу та конфігурацію взаємозв'язків між мікросередовищними параметрами, формуючи специфічні для кожного виду кореляційні структури.

Рівність кореляційних матриць між чотирма секторами була відхилена (CovCorTest, значення статистики тесту = 2,86). Отриманий результат залишався стійким при застосуванні методу повторної вибірки (bootstrap), що підтверджується статистично значущими значеннями P ($P = 0,003$; $B = 2000$). Це свідчить про те, що кореляційна структура між змінними мікросередовища суттєво відрізняється залежно від експозиційного сектора.

Парні порівняння кореляційних матриць показали, що загальна значуща неоднорідність між секторами була переважно зумовлена відмінностями між північним і західним секторами (ВН-кориговане $P = 0,006$). Порівняння між східним і західним секторами виявило тенденцію до статистичної значущості (ВН-кориговане $P = 0,058$), тоді як між іншими парами секторів статистично значущих відмінностей не було встановлено.

Найбільші відхилення спостерігалися для взаємозв'язків між температурою та вологістю, зокрема між вологістю повітря та температурою повітря ($\Delta r \approx -0,18$), що свідчить про більш сильний негативний взаємозв'язок між цими показниками у західному секторі.

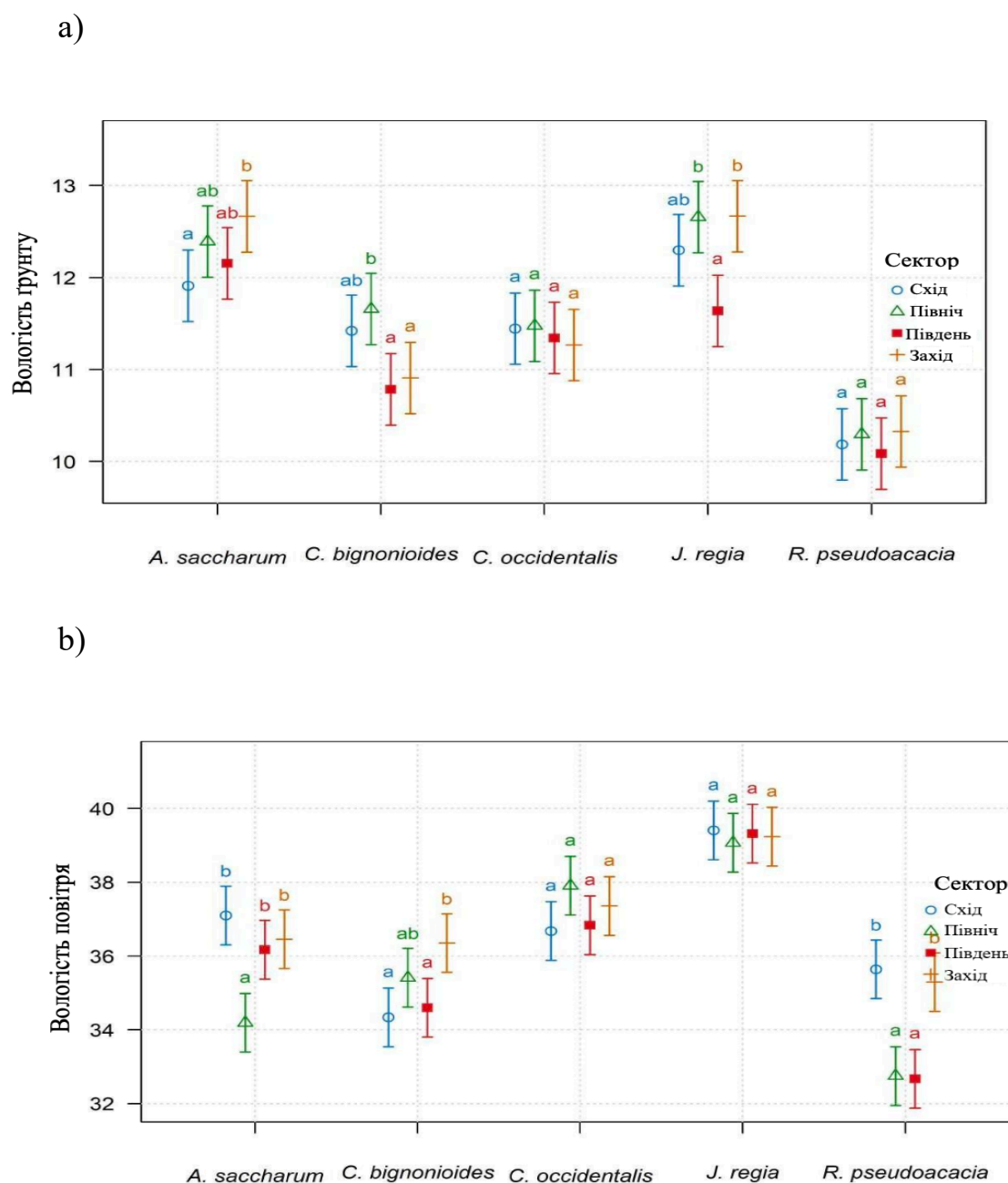
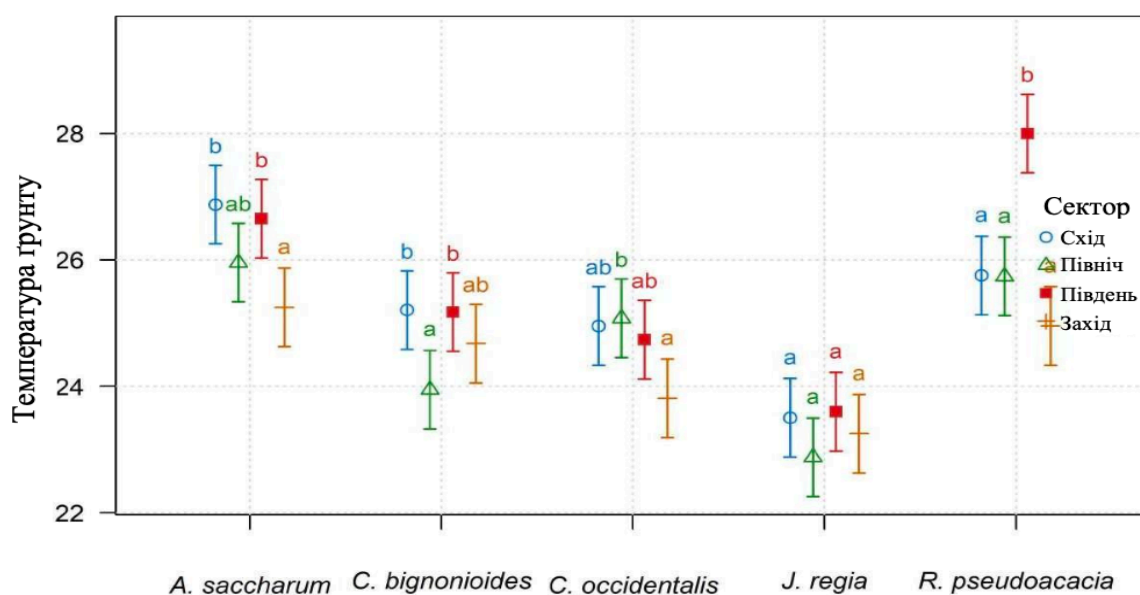
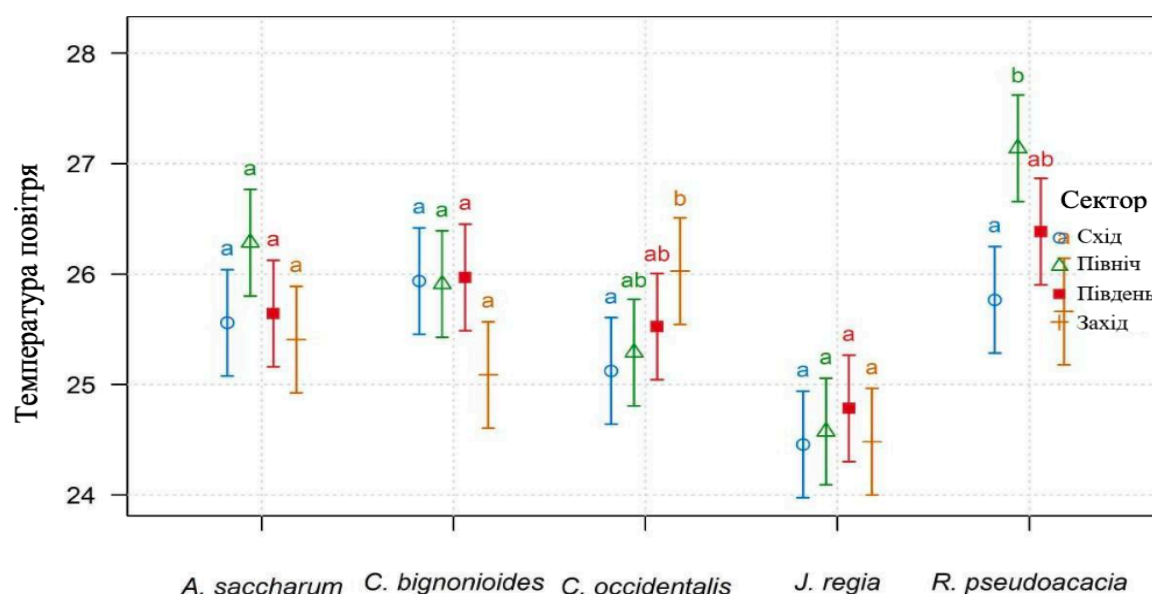


Рисунок 4.5 - Варіація мікрокліматичних умов під кронами дерев залежно від експозиційного сектора для досліджуваних видів. Панелі відображають середні значення ($\pm 95\%$ довірчі інтервали) для: (а) вологості ґрунту, (б) вологості повітря виміряних у чотирьох кардинальних секторах (Схід, Північ, Південь і Захід). Різні символи та кольори позначають відповідні сектори. Літери над стовпчиками похибок позначають статистично значущі відмінності між секторами в межах кожного виду за результатами post hoc тесту Тьюкі ($P < 0,05$); сектори, позначені однаковими літерами, не відрізняються статистично значуще. Назви видів подані у скороченому вигляді та виділені курсивом.



c)



d)

Рисунок 4.6 - Варіація мікрокліматичних умов під кронами дерев залежно від експозиційного сектора для досліджуваних видів. Панелі відображають середні значення ($\pm 95\%$ довірчі інтервали) для: (c) температури ґрунту та (d) температури повітря, вимірюваних у чотирьох кардинальних секторах (Схід, Північ, Південь і Захід). Різні символи та кольори позначають відповідні сектори. Літери над стовпчиками похибок позначають статистично значущі відмінності між секторами в межах кожного виду за результатами *post hoc* тесту Тьюкі ($P < 0,05$); сектори, позначені однаковими літерами, не відрізняються статистично значуще. Назви видів подані у скороченому вигляді та виділені курсивом.

Глобальний тест CovCorTest для фактора положення крони не виявив статистично значущих відмінностей між кореляційними матрицями змінних мікросередовища для трьох положень крони (гіпотеза рівності кореляцій): $T = 1,051$, $p = 0,366$ (bootstrap, $B = 2000$). Це свідчить про те, що, незважаючи на можливі зміни середніх значень температури або вологості залежно від положення крони, структура парних взаємозв'язків між змінними (тобто взаємозв'язок між показниками вологості та температури) залишається подібною для різних положень крони.

Парні порівняння між положеннями крони підтвердили результат глобального тесту CovCorTest: після застосування ВН-корекції статистично значущих відмінностей у кореляційній структурі не було виявлено (усі скориговані значення $p = 0,402-0,662$).

Метод багатовимірного шкалювання (MDS) було застосовано на основі матриці відстаней між кореляційними структурами з метою виявлення основних градієнтів варіабельності в організації кореляцій між мікрокліматичними змінними. Інтерпретація отриманих осей MDS може бути підтверджена відповідними кореляційними матрицями, оскільки полярні положення об'єктів у просторі ординації добре узгоджуються з контрастними типами кореляційних структур, характерними для окремих видів дерев і фракцій крони. Це свідчить про те, що виявлені градієнти ординації відображають реальні відмінності в конфігурації взаємозв'язків між температурними та вологісними компонентами мікроклімату.

Перша вимірність MDS визначається контрастом між *Robinia pseudoacacia* та *Celtis occidentalis* і відображає градієнт реорганізації компромісу між вологістю та температурою. У напрямку до полюса *Celtis* кореляції між вологістю повітря та температурними змінними стають менш негативними, що свідчить про часткове послаблення зв'язку між атмосферною вологістю та температурним режимом. Натомість полюс *Robinia* характеризується посиленням негативних кореляцій між вологістю повітря та температурою ґрунту, а також одночасним посиленням позитивних взаємозв'язків між температурними змінними, що відображає перерозподіл і посилення антагоністичних взаємодій між вологісними та температурними компонентами мікроклімату.

Категорії експозиційного сектора та положення крони не демонстрували великих абсолютних координат уздовж осі MDS1. Таким чином, перша вимірність MDS визначається переважно видовими відмінностями, що проявляються як контраст у кореляційній структурі мікрокліматичних змінних між *Robinia pseudoacacia* та *Celtis occidentalis*, тоді як експозиційний сектор і положення крони мають другорядний вплив і не займають полярних положень уздовж першої осі. Це означає, що для *Robinia pseudoacacia* та *Celtis occidentalis* диференціація мікрокліматичних умов за експозиційним сектором або положенням крони не призводить до суттєвої перебудови кореляційних структур мікрокліматичних показників.

Друга вимірність MDS визначається переважно видом *Acer saccharum* Marshall і відображає видоспецифічну перебудову атмосферного взаємозв'язку. На відміну від основного компромісу між вологістю та температурою, відображеного першою вимірністю MDS (MDS1), ця вимірність характеризується посиленням негативним зв'язком між вологістю повітря та температурою повітря, тоді як кореляції, що включають вологість ґрунту та блок температурних змінних, залишаються переважно незмінними.

Таким чином, друга вимірність MDS (MDS2) представляє ортогональний режим варіабельності, зумовлений відокремленням атмосферної вологості від температурного режиму, а не перерозподілом взаємодій між ґрунтом і атмосферою. Уздовж другої вимірності MDS як експозиційний сектор, так і положення крони демонструють чітку диференціацію. Західний сектор займає позитивний полюс, тоді як Східний і Північний сектори зміщені до негативного полюса (при цьому Південний сектор займає проміжне положення). Щодо положення в кроні, стовбур розташований на негативному кінці, тоді як периферійна частина крони зміщується до позитивного кінця, а середня частина групується поблизу загального положення.

Диференціація мікрокліматичних умов у межах крони є найбільш вираженою у *Acer saccharum*. Цей вид узгоджується з другою вимірністю MDS, уздовж якої експозиційний сектор і положення в кроні демонструють чітке розділення, що свідчить про суттєвий внесок просторової неоднорідності в межах крони у перебудову кореляційної структури мікрокліматичних змінних.

Аналіз надлишковості (RDA) показав, що мікрокліматичні змінні статистично значуще пояснюють варіацію мікрокліматичних умов під наметом крони. Модель є високодостовірною відповідно до результатів пермутаційного тестування ($F = 63.081$, $P = 0.001$; 999 пермутацій) і пояснює 53.1% загальної дисперсії багатовимірної відповіді ($R^2 = 0.531$; $R^2_{adj} = 0.522$).

Структура канонічного простору визначається кількома статистично значущими осями. Перша вісь пояснює найбільшу частку канонічної варіації (Variance = 2.311; $F = 228.99$; $P = 0.001$), тоді як друга вісь також є високозначущою та інформативною (Variance = 0.595; $F = 59.19$; $P = 0.001$). Наступні осі також залишаються статистично значущими (RDA3: $F = 23.07$; $P = 0.001$; RDA4: $F = 4.11$; $P = 0.008$), тоді як п'ята вісь (RDA5) не відрізняється від випадкового шуму ($P = 0.783$).

Це свідчить про те, що основні закономірності, які пов'язують мікрокліматичні умови навколишнього середовища з мікрокліматичними умовами під наметом крони, адекватно відображаються першими двома (і частково третьою) канонічними осями.

Послідовні (тип I) тести факторів показали, що всі п'ять мікрокліматичних предикторів здійснюють незалежний і статистично значущий внесок у пояснення багатовимірної відповіді (усі $P = 0.001$). Найбільші частки поясненої варіації пов'язані з вологістю ґрунту (Variance = 0.986; $F = 97.65$) та вологістю повітря (Variance = 0.876; $F = 86.75$), а також температурою ґрунту (Variance = 0.845; $F = 83.75$). Менший, але все ще статистично значущий внесок спостерігається для температури повітря (Variance = 0.251; $F = 24.86$) та освітленості (Variance = 0.226; $F = 22.39$).

Геометрія біплоту виявляє два основні градієнти. Вісь RDA1 відображає контраст між «термічним» і «вологісним» напрямками: позитивна частина осі пов'язана з високими значеннями мікрокліматичних змінних, таких як температура ґрунту (0.901) і температура повітря (0.826), тоді як негативна частина визначається вологістю повітря (-0.709) і вологістю ґрунту (-0.577). Відповідно, змінні підкранового середовища узгоджуються з тим самим градієнтом: температура ґрунту (2.101), температура повітря (1.912) і температура листка (1.585) мають позитивні навантаження на вісь RDA1, тоді як вологість повітря (-1.765) і вологість ґрунту

(-1.451) — негативні, що свідчить про узгоджену орієнтацію «термічних» і «вологісних» компонентів між загальним мікрокліматом і умовами під наметом крони.

Вісь RDA2 додатково підкреслює варіацію, пов'язану з освітленістю та вологістю. Серед мікрокліматичних предикторів найбільші координати мають вологість ґрунту (0.572), освітленість (0.535) і температура повітря (0.457), тоді як серед підкранових змінних найвищі навантаження спостерігаються для вологості ґрунту (1.496), освітленості (0.889) і температури повітря (0.774). Це свідчить про те, що, крім основного градієнта «вологість–температура», існує вторинна канонічна компонента, яка відображає спільну варіабельність освітленості та окремих аспектів вологості й температури в підкрановому середовищі.

Аналіз розподілу варіації показав, що мікрокліматичні змінні, видова належність дерев і дата відбору проб спільно пояснюють значну частку варіабельності мікрокліматичних умов під кроною дерев. Загальна модель RDA є високодостовірною відповідно до результатів пермутаційного тестування ($F = 29.712$, $P = 0.001$; 999 пермутацій) і характеризується високим рівнем поясненої варіації ($R^2_{adj} = 0.732$). Важливо, що структура декомпозиції варіації показує, що пояснювальна здатність предикторів визначається не лише їх незалежними ефектами, але й взаємодіями між ними (рис. 4.7).

Найбільший унікальний внесок у варіабельність мікрокліматичних умов забезпечує часовий компонент. Часткова модель, що оцінює ефект дати відбору проб після контролю мікрокліматичних умов і видової належності, залишається високодостовірною ($F = 12.011$, $P = 0.001$) і пояснює значну частку варіації ($R^2_{adj} = 0.193$). Це свідчить про те, що мікрокліматичні умови під кроною організовані насамперед уздовж вираженого сезонного градієнта.

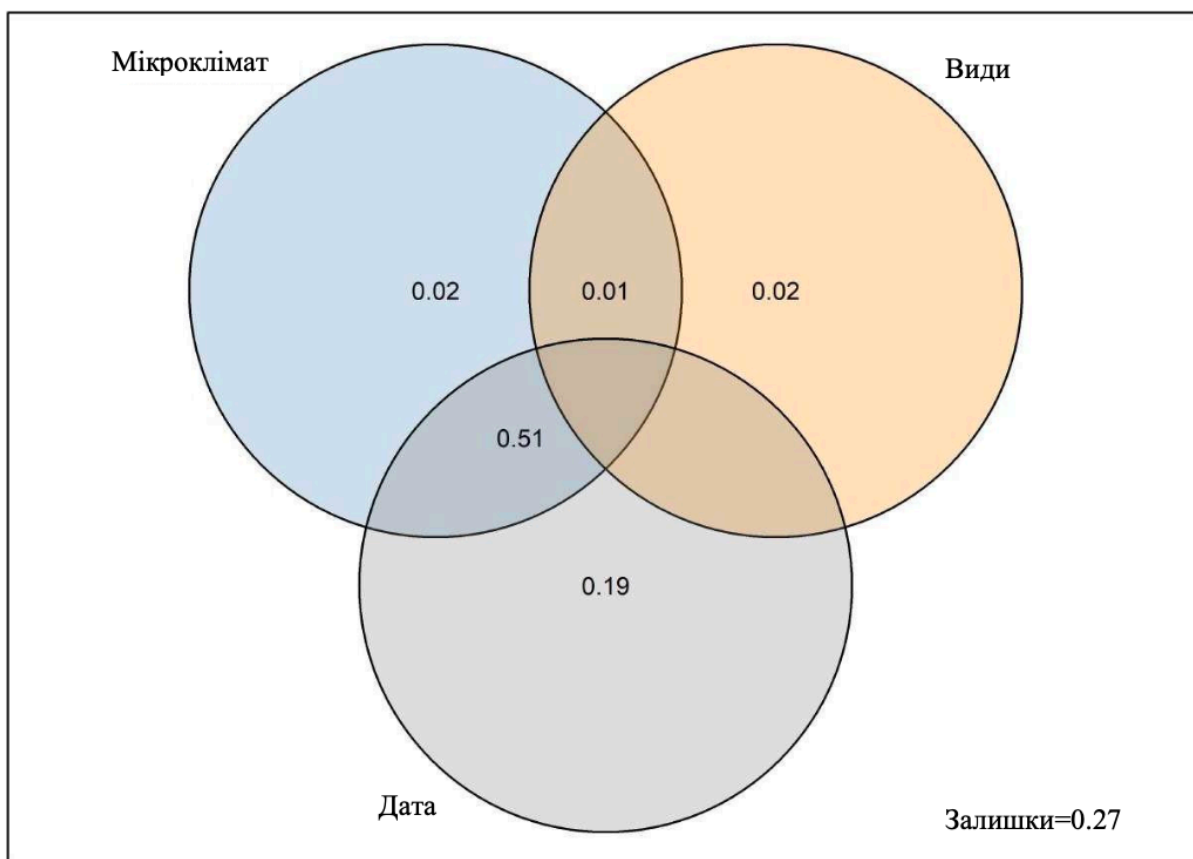


Рисунок 4.7 - Розподіл варіації мікрокліматичних змінних під кроною між трьома групами предикторів: мікроклімат навколишнього середовища, видова належність дерев і дата відбору проб. Значення відображають скориговані частки поясненої варіації, отримані за допомогою часткового аналізу надлишковості (partial redundancy analysis). Показано унікальні та спільні внески груп предикторів, тоді як непояснена частка наведена як залишкова варіація.

Незалежний внесок мікрокліматичних предикторів після врахування часових і видових ефектів також залишається статистично значущим ($F = 3.981$, $P = 0.001$), але є відносно невеликим за величиною ($R^2_{adj} = 0.015$). Це демонструє, що вплив мікроклімату на підкранові умови є сильно структурованим у часі: більша частина варіації, пов'язаної з мікрокліматом, проявляється через його сезонну динаміку та взаємодію з часовим фактором, а не як незалежний часово інваріантний ефект.

Видова належність дерев також здійснює статистично значущий, хоча порівняно помірний, унікальний внесок у мікрокліматичну варіабельність ($F = 6.958$, $P = 0.001$; $R^2_{adj} = 0.024$). Проте структура розподілу варіації свідчить, що видові ефекти проявляються передусім через модулювання мікрокліматичних впливів, а не

через автономну часову динаміку. Це означає, що різні види дерев по-різному трансформують однакові мікрокліматичні умови у специфічні підкранові середовища, тоді як власне видовий ефект залишається відносно стабільним у часі.

Організація мікрокліматичних умов під кроною визначається взаємодією між предикторами: мікрокліматичні ефекти тісно пов'язані із сезонною мінливістю, тоді як видова належність визначає спосіб, у який ці ефекти реалізуються в підкранових умовах без прояву сильної внутрішньої часової варіабельності. Ця ієрархія ефектів пояснює домінування спільних компонентів у структурі варіації та відносно слабкий «чистий» мікрокліматичний сигнал.

Сезонна динаміка змін вологості ґрунту під кроною дерев характеризується вираженою часовою структурою та значною видовою диференціацією (рис. 4.8). Ефект дати відбору проб є домінуючим джерелом варіації змін вологості ґрунту, що свідчить про чіткі сезонні зрушення у відносному контрасті між підкрановими та фоновими мікрокліматичними умовами ($F = 51.752$, $P < 0.001$) (табл. 4.3).

Таблиця 4.3 - Таблиці дисперсійного аналізу ANOVA з фіксованими ефектами (для кожної змінної-відгуку) для показників процентних змін, отриманих на основі MANOVA. Для кожного фактора наведено ступені свободи (Df), F-критерій та рівень значущості (p).

Змінна-відгук	Фактор	Ступені свободи (Df)	F-значення	p-рівень
Зміна вологості ґрунту (%)	Дата	18	51.752	<0.001
	Вид	4	21.019	<0.001
	Дата × Вид	72	7.354	<0.001
	Залишки	190	-	-
Зміна вологості повітря (%)	Дата	18	8.475	<0.001
	Вид	4	2.166	0.074
	Дата × Вид	72	2.251	<0.001
	Залишки	190	-	-
Зміна освітленості (%)	Дата	18	74.172	<0.001
	Вид	4	49.319	<0.001
	Дата × Вид	72	26.894	<0.001
	Залишки	190	-	-
Зміна температури ґрунту (%)	Дата	18	14.199	<0.001
	Вид	4	4.967	<0.001
	Дата × Вид	72	2.466	<0.001
	Залишки	190	-	-

Зміна температури листка (%)	Дата	18	6.260	<0.001
	Вид	4	7.936	<0.001
	Дата × Вид	72	2.723	<0.001
	Залишки	190	-	-
Зміна температури повітря (%)	Дата	18	1.643	0.053
	Вид	4	2.293	0.061
	Дата × Вид	72	1.740	0.002
	Залишки	190	-	-

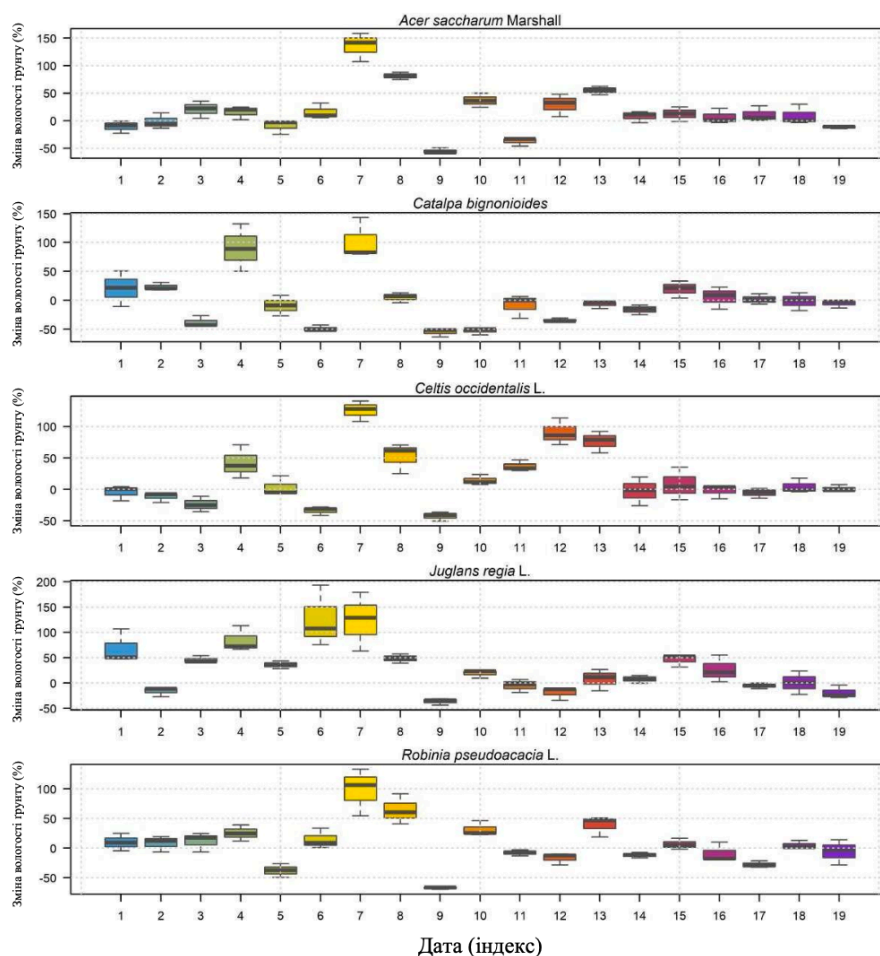


Рисунок 4.8 - Сезонна динаміка змін вологості ґрунту (%) під наметом крони дерев відносно фонового мікроклімату протягом року. Вісь Х відображає дати відбору проб, проіндексовані таким чином: 1 – 22.05.2025; 2 – 30.05.2025; 3 – 05.06.2025; 4 – 13.06.2025; 5 – 20.06.2025; 6 – 25.06.2025; 7 – 03.07.2025; 8 – 11.07.2025; 9 – 21.07.2025; 10 – 31.07.2025; 11 – 08.08.2025; 12 – 15.08.2025; 13 – 22.08.2025; 14 – 29.08.2025; 15 – 05.09.2025; 16 – 12.09.2025; 17 – 19.09.2025; 18 – 26.09.2025; 19 – 03.10.2025.

Центральна лінія позначає медіану, прямокутники відображають міжквартильний розмах (25-й–75-й процентилі), а «вуса» простягаються до 1,5× міжквартильного розмаху. Викиди не показані. Кольори відповідають датам відбору проб.

Окрім часового компонента, видова належність дерев має статистично значущий основний ефект ($F = 21.019, P < 0.001$), що демонструє стабільні міжвидові відмінності у величині та напрямку змін вологості ґрунту відносно фонових умов. Сезонні траєкторії змін вологості ґрунту істотно відрізняються між видами, що підтверджується високодостовірною взаємодією дата $\times$ вид ($F = 7.354, P < 0.001$).

Ця взаємодія свідчить про те, що види дерев не лише зміщують загальний рівень вологості ґрунту, але й модулюють її сезонний характер, включаючи час і амплітуду позитивних і негативних відхилень від фонового мікроклімату. У результаті періоди підвищеної вологості ґрунту під кроною дерев порівняно з фоновими умовами, а також фази виснаження вологи, відбуваються в різний час і з різною інтенсивністю залежно від виду.

У сукупності ці закономірності свідчать про те, що сезонна варіабельність змін вологості ґрунту визначається поєднанням сильного часового впливу та видоспецифічної модифікації, опосередкованої структурою крони, причому їх взаємодія відіграє ключову роль у формуванні спостережуваної динаміки. Таким чином, режим вологості ґрунту під кроною дерев є часово динамічною та видозалежною відповіддю на фонові мікрокліматичні умови, а не статичним або рівномірним відхиленням від фонового середовища.

Сезонна динаміка змін температури ґрунту під кронами дерев характеризується чіткою часовою організацією та вираженою міжвидовою диференціацією (рис. 4.9). Дата відбору проб є статистично значущим фактором змін температури ґрунту ($F = 14.199, P < 0.001$), що вказує на систематичні сезонні коливання відносної різниці між підкроновими та фоновими мікрокліматичними умовами (табл. 4.3). Види дерев також мають статистично значущий основний ефект ($F = 4.967, P < 0.001$), що відображає стабільні відмінності між видами за середньою величиною та напрямом модифікації температури ґрунту.

Сезонні траєкторії змін температури ґрунту істотно відрізняються між видами, що підтверджується статистично значущою взаємодією факторів дата $\times$ вид ($F = 2.466, P < 0.001$). Ця взаємодія свідчить про те, що види відрізняються не лише за загальним рівнем модифікації температури ґрунту, але й за часом та амплітудою

сезонних реакцій, формуючи видоспецифічні закономірності охолодження та нагрівання відносно фонового мікроклімату.

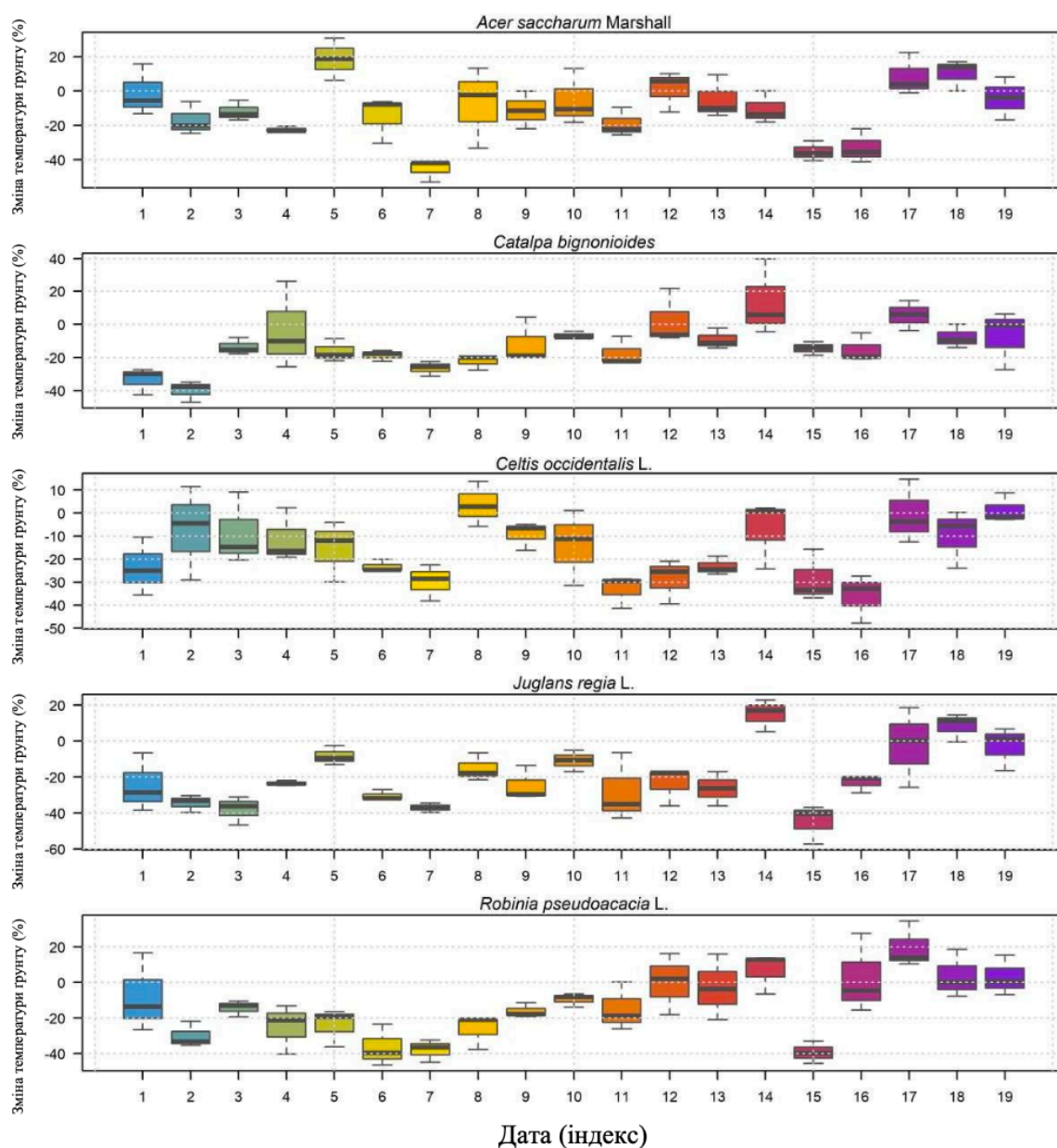


Рисунок 4.9 - Сезонна динаміка змін температури ґрунту (%) під кронами дерев відносно фонових мікрокліматичних умов протягом року. Вісь X відображає дати відбору проб, пронумеровані наступним чином: 1 – 22.05.2025; 2 – 30.05.2025; 3 – 05.06.2025; 4 – 13.06.2025; 5 – 20.06.2025; 6 – 25.06.2025; 7 – 03.07.2025; 8 – 11.07.2025; 9 – 21.07.2025; 10 – 31.07.2025; 11 – 08.08.2025; 12 – 15.08.2025; 13 – 22.08.2025; 14 – 29.08.2025; 15 – 05.09.2025; 16 – 12.09.2025; 17 – 19.09.2025; 18 – 26.09.2025; 19 – 03.10.2025. Центральна лінія позначає медіану, прямокутники відображають міжквартильний діапазон (25–75-й перцентилі), а «вуса» простягаються до 1,5 міжквартильного діапазону. Викиди не показані. Кольори відповідають різним датам відбору проб.

Зміни вологості повітря під кронами дерев значно варіюють протягом сезону, що свідчить про те, що підкорова атмосфера не підтримує фіксоване відхилення відносно фонових мікрокліматичних умов (рис. 4.9). Часовий сигнал є чітко вираженим: дата відбору проб є статистично значущим фактором змін вологості ($F = 8.475$, $P < 0.001$), що узгоджується з повторюваними змінами напряду та величини відхилень протягом річного циклу (табл. 4.3). На фоні цього сильного сезонного впливу видова належність робить незначний внесок як усереднений у часі фактор. Основний видовий ефект є слабким і не досягає традиційного рівня статистичної значущості ($F = 2.166$, $P = 0.074$), що свідчить про відсутність стабільного ранжування видів від «більш зволожуючих» до «менш зволожуючих» при аналізі всього сезону загалом. Найбільш інформативною є взаємодія між датою та видом ($F = 2.251$, $P < 0.001$), яка показує, що міжвидові відмінності проявляються переважно у формі сезонних траєкторій, а не як сталі зміщення. Іншими словами, види дерев модулюють те, коли (і наскільки сильно) вологість під короною відхиляється від фонових умов, причому періоди підвищеної або зниженої вологості під короною виникають у різний час залежно від виду.

Зміни температури повітря під кронами дерев відносно фонових мікрокліматичних умов демонструють виражену часову структуру, хоча сила цього сигналу є слабшою порівняно з показниками, пов'язаними з ґрунтом (рис. 4.10). Візуальний аналіз сезонних траєкторій виявляє чергування періодів охолодження та нагрівання, індукованих короною, що свідчить про немонотонну реакцію температури повітря під короною на фонові умови.

Основний ефект дати відбору проб наближається до, але не досягає рівня статистичної значущості ($F = 1.643$, $P = 0.053$), що вказує на недостатність лише сезонної варіабельності для пояснення закономірностей змін температури повітря при усередненні між видами (табл. 4.3). Аналогічно, видова належність не проявляє сильного часово-інваріантного ефекту ($F = 2.293$, $P = 0.061$), що свідчить про відсутність стабільного ранжування деревних видів за їхнім загальним впливом на температуру повітря під короною.

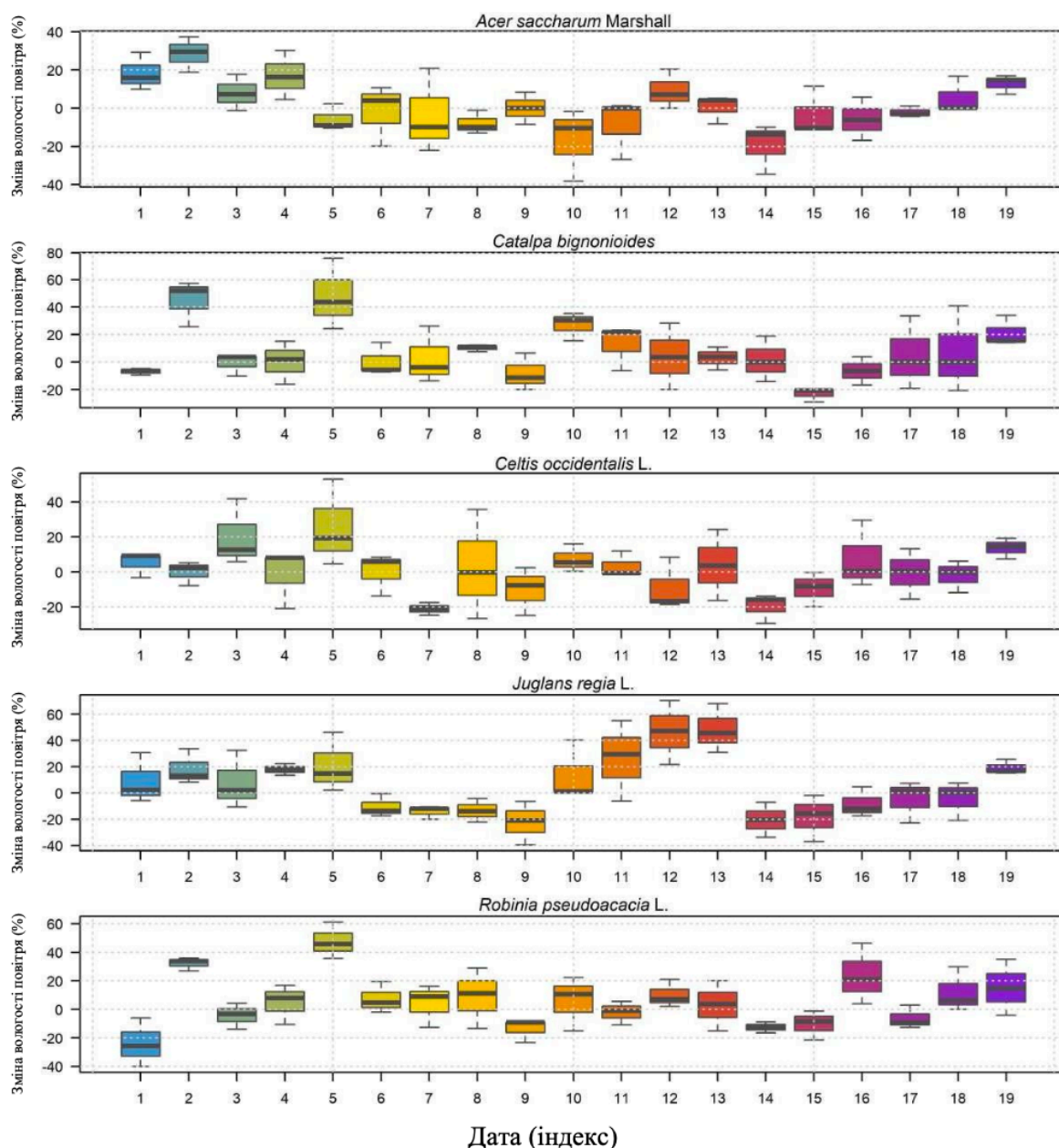


Рисунок 4.10 - Сезонна динаміка змін вологості повітря (%) під кронами дерев відносно фонових мікрокліматичних умов протягом року. Вісь Х відображає дати відбору проб, заковані таким чином: 1 – 22/05/2025; 2 – 30/05/2025; 3 – 05/06/2025; 4 – 13/06/2025; 5 – 20/06/2025; 6 – 25/06/2025; 7 – 03/07/2025; 8 – 11/07/2025; 9 – 21/07/2025; 10 – 31/07/2025; 11 – 08/08/2025; 12 – 15/08/2025; 13 – 22/08/2025; 14 – 29/08/2025; 15 – 05/09/2025; 16 – 12/09/2025; 17 – 19/09/2025; 18 – 26/09/2025; 19 – 03/10/2025. Центральна лінія позначає медіану, прямокутники відображають міжквартильний діапазон (25-й–75-й перцентилі), а «вуса» простягаються до 1,5× міжквартильного діапазону. Викиди не показані. Кольори відповідають датам відбору проб.

Незважаючи на слабкість основних ефектів, взаємодія між датою відбору проб і видом є статистично значущою ($F = 1.740$, $P = 0.002$), що підкреслює, що видові відмінності проявляються насамперед через часову модуляцію. Види відрізняються за часом, напрямком і величиною відхилень температури повітря: деякі демонструють короточасні ефекти нагрівання в окремі періоди сезону, тоді як інші проявляють епізодичне охолодження відносно фонових умов.

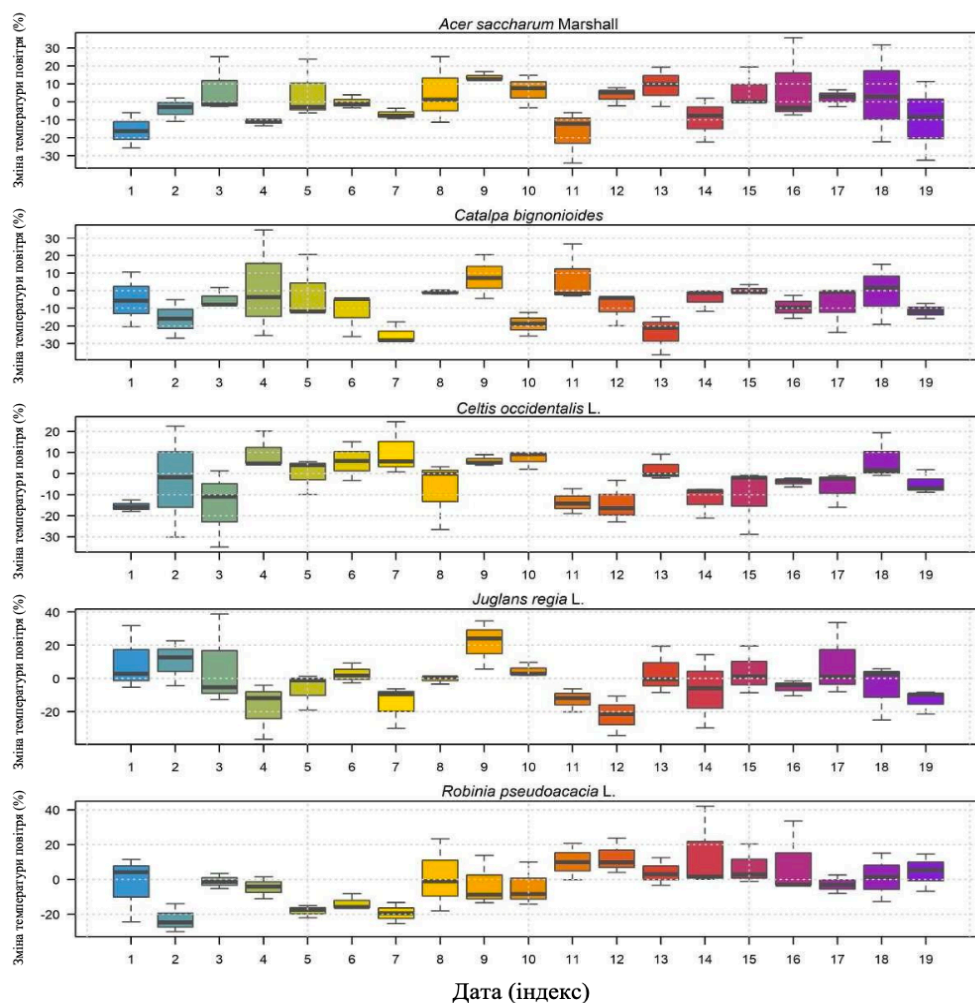


Рисунок 4.11 - Сезонна динаміка змін температури повітря (%) під кронами дерев відносно фонових мікрокліматичних умов протягом року. Вісь X представляє дати відбору проб, закодовані таким чином: 1 – 22.05.2025; 2 – 30.05.2025; 3 – 05.06.2025; 4 – 13.06.2025; 5 – 20.06.2025; 6 – 25.06.2025; 7 – 03.07.2025; 8 – 11.07.2025; 9 – 21.07.2025; 10 – 31.07.2025; 11 – 08.08.2025; 12 – 15.08.2025; 13 – 22.08.2025; 14 – 29.08.2025; 15 – 05.09.2025; 16 – 12.09.2025; 17 – 19.09.2025; 18 – 26.09.2025; 19 – 03.10.2025. Центральна лінія позначає медіану, прямокутники відображають міжквартильний розмах (25-й–75-й перцентилі), а «вуса» простягаються до 1,5× міжквартильного розмаху. Викиди не показані. Кольори відповідають різним датам відбору проб.

Сезонні зміни температури листка під кронами дерев, виражені як відсоткове відхилення від фонових мікрокліматичних умов, демонструють виражену часову структуру та видоспецифічні закономірності (рис. 4.11). Для всіх досліджених видів реакції температури листка протягом сезону чергуються між фазами охолодження та нагрівання, що свідчить про високодинамічну регуляцію теплового режиму листків, а не про стабільний буферний ефект.

Дата відбору проб має статистично значущий вплив на зміну температури листка ($F = 6.260$, $P < 0.001$), що підтверджує наявність сезонного сигналу (табл. 4.3). Видова належність також робить значущий внесок ($F = 7.936$, $P < 0.001$), що свідчить про відмінності між деревними видами у їхній здатності модифікувати тепловий режим листків відносно фонових умов.

Проте ці основні ефекти самі по собі не відображають усієї складності спостережуваних закономірностей. Статистично значуща взаємодія між датою відбору проб і видом ($F = 2.723$, $P < 0.001$) вказує на те, що видові відмінності у зміні температури листка суттєво залежать від часу. Окремі види демонструють різні сезонні траєкторії, причому час і величина нагрівання або охолодження листків змінюються протягом вегетаційного періоду.

У деяких видів виражені позитивні відхилення спостерігаються в середині або наприкінці сезону, тоді як інші зберігають переважно негативні відхилення або демонструють короточасні періоди нагрівання.

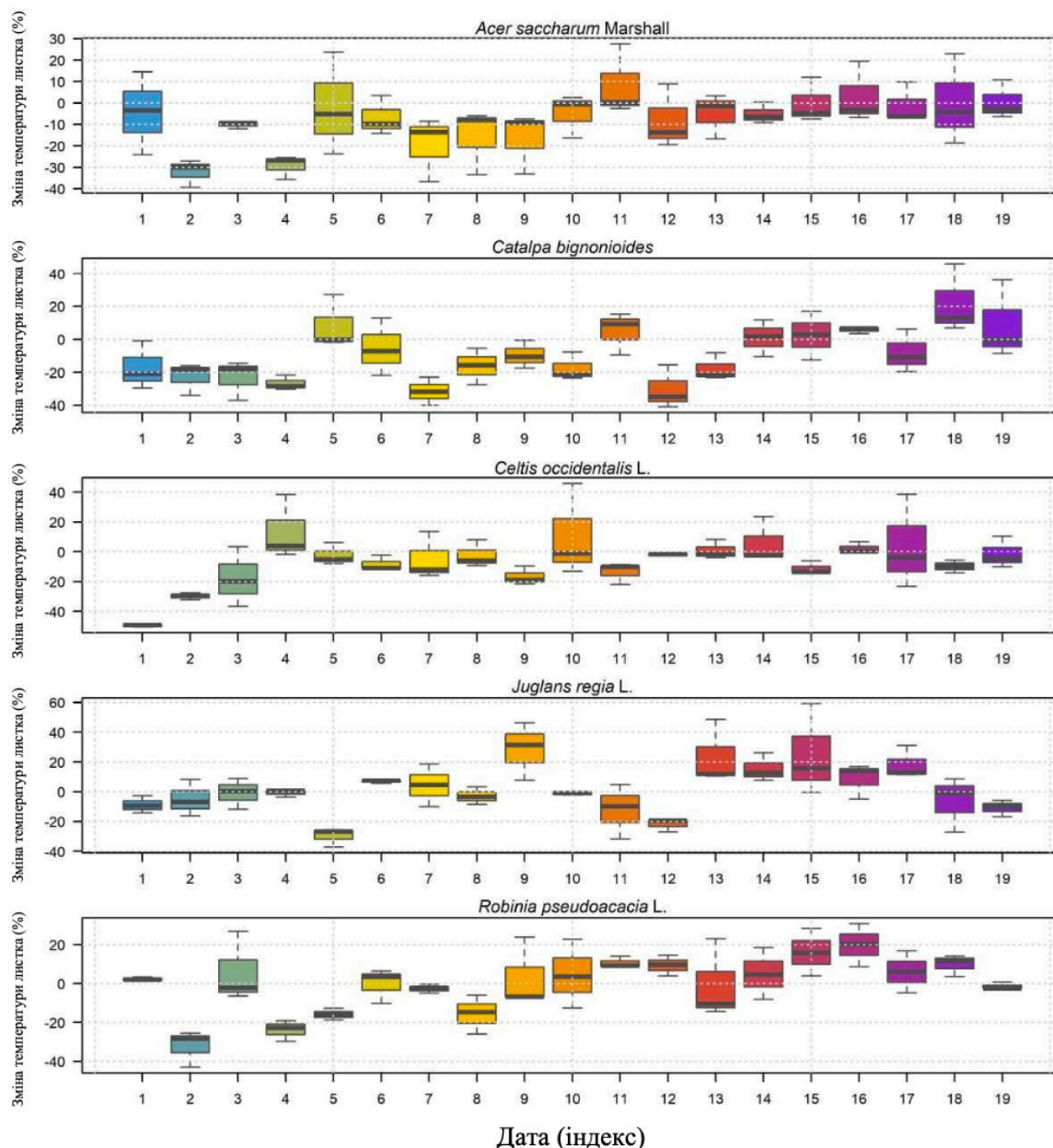


Рисунок 4.12 - Сезонна динаміка змін температури листка (%) під кронами дерев відносно фонових мікрокліматичних умов протягом року. Вісь Х представляє дати відбору проб, закодовані таким чином: 1 – 22.05.2025; 2 – 30.05.2025; 3 – 05.06.2025; 4 – 13.06.2025; 5 – 20.06.2025; 6 – 25.06.2025; 7 – 03.07.2025; 8 – 11.07.2025; 9 – 21.07.2025; 10 – 31.07.2025; 11 – 08.08.2025; 12 – 15.08.2025; 13 – 22.08.2025; 14 – 29.08.2025; 15 – 05.09.2025; 16 – 12.09.2025; 17 – 19.09.2025; 18 – 26.09.2025; 19 – 03.10.2025. Центральна лінія позначає медіану, прямокутники відображають міжквартильний розмах (25-й–75-й перцентилі), а «вуса» простягаються до 1,5× міжквартильного розмаху. Викиди не показані. Кольори відповідають різним датам відбору проб.

Характер змін освітленості під кронами дерев демонструє стабільно сильне зменшення надходження світла порівняно з фоновими мікрокліматичними умовами, що свідчить про постійне затінення кроною протягом усього періоду спостережень (рис. 4.13).

Для всіх досліджених видів освітленість під кроною залишається значно нижчою за фоновий рівень, що підкреслює: ослаблення світла є структурною властивістю середовища крони, а не короткочасним сезонним ефектом.

Варіація змін освітленості визначається насамперед часовим компонентом, який демонструє найсильніший статистичний сигнал ($F = 74.172$, $P < 0.001$) і відображає виражену сезонну перебудову перехоплення світла кронами (табл. 5). Видова належність також є важливим джерелом варіабельності ($F = 49.319$, $P < 0.001$), що свідчить про суттєві міжвидові відмінності в інтенсивності затінення.

Високочащу взаємодія дати $\times$ виду ($F = 26.894$, $P < 0.001$) додатково показує, що види відрізняються не лише за величиною зменшення освітленості, але й за часом та формою сезонної динаміки цих змін.

Графік демонструє контрастні видоспецифічні патерни: деякі дерева мають надзвичайно сильне ослаблення світла на початку сезону з подальшим частковим послабленням ефекту; інші підтримують стабільно низький рівень освітленості під кроною протягом більшості дат спостережень.

Короткочасні підвищення відносної освітленості трапляються рідко та обмежені окремими видами й датами, що свідчить про тимчасові фенологічні ефекти, а не про стійкі структурні зміни відкритості крони.

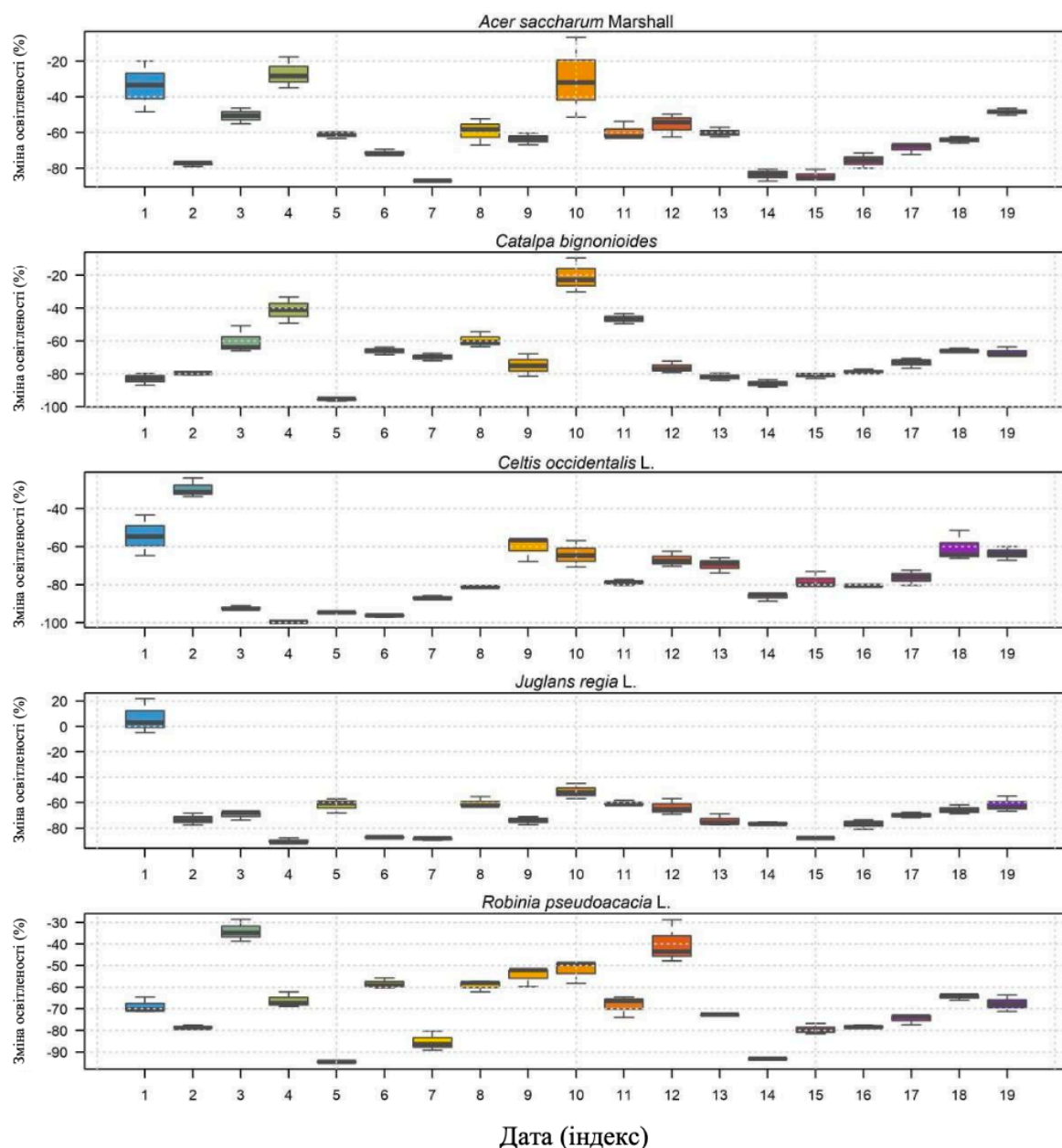


Рисунок 4.13 - Сезонна динаміка змін освітленості (%) під кронами дерев відносно фонових мікрокліматичних умов протягом року. Вісь Х представляє дати відбору проб, заковані таким чином: 1 – 22.05.2025; 2 – 30.05.2025; 3 – 05.06.2025; 4 – 13.06.2025; 5 – 20.06.2025; 6 – 25.06.2025; 7 – 03.07.2025; 8 – 11.07.2025; 9 – 21.07.2025; 10 – 31.07.2025; 11 – 08.08.2025; 12 – 15.08.2025; 13 – 22.08.2025; 14 – 29.08.2025; 15 – 05.09.2025; 16 – 12.09.2025; 17 – 19.09.2025; 18 – 26.09.2025; 19 – 03.10.2025. Центральна лінія позначає медіану, прямокутники відображають міжквартильний розмах (25-й–75-й перцентилі), а «вуса» простягаються до 1,5× міжквартильного розмаху. Викиди не показані. Кольори відповідають різним датам відбору проб.

Аналіз добової динаміки, міждобових відмінностей та впливу видів дерев показав, що зазначені фактори пояснюють 66% варіації температури повітря в зоні проєкції крони протягом світлової частини доби (табл. 4.3).

Найнижча середня температура повітря становила $28,3 \pm 0,9$ °C, а найвища — $30,3 \pm 1,0$ °C. Найвищі значення температури повітря спостерігалися під наметом крон таких видів, як *Acer negundo* L., *Gleditsia triacanthos* L., *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott, тоді як найнижчі — під кронами *Acer saccharum* Marshall., *Ulmus pumila* L., *Celtis occidentalis* L. (рис. 4.14).

Досліджувані фактори пояснювали 79% варіації відносної вологості повітря в підкроновому просторі досліджених видів. Вологість повітря змінювалася в межах від $47,2 \pm 1,8\%$ до $51,2 \pm 1,6\%$. Найвищі значення відносної вологості повітря відзначено під кронами *Fraxinus pennsylvanica* Marshall., *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, *Aesculus hippocastanum* L., тоді як найнижчі — під кронами *Gleditsia triacanthos* L., *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott, *Acer negundo* L.

Аналіз добових змін, міждобових відмінностей і впливу видів дерев показав, що ці фактори пояснюють 67% варіації температури ґрунту під кронами дерев. Найнижча середня температура ґрунту становила $22,3 \pm 0,6$ °C, а найвища — $26,0 \pm 0,9$ °C. Найвищі значення температури ґрунту спостерігалися під кронами *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott, *Gymnocladus dioica* (L.) K. Koch, *Aesculus hippocastanum* L., тоді як найнижчі — під кронами *Ulmus pumila* L., *Celtis occidentalis* L., *Quercus rubra* L. (рис. 2).

Дерева різних видів знижували температуру ґрунту порівняно з температурою повітря на 2,1–3,2%. Найбільший вплив на зниження температури ґрунту мали *Acer saccharum*, *Aesculus hippocastanum*, тоді як найменший — *Ailanthus altissima*, *Robinia pseudoacacia*, *Styphnolobium japonicum*.

Таблиця 4.3 - Оцінка узагальнених лінійних моделей впливу дати, часу та видів дерев на кліматичні показники

Предиктор	Температура повітря (F=70,76; R ² =0,66)	Вологість повітря (F=133,87; R ² =0,79)	Температура ґрунту (F=75,12; R ² =0,67)	Вологість ґрунту (F=125,93; R ² =0,78)
Дата				
13.06.2023	-1,39 ± 0,06*	1,38 ± 0,05*	-1,50 ± 0,06*	1,36 ± 0,05*
26.07.2023	-0,53 ± 0,06*	0,52 ± 0,05*	-0,05 ± 0,06	-0,65 ± 0,05*
Час доби				
Полудень	0,25 ± 0,06*	-0,15 ± 0,05*	-0,22 ± 0,06*	0,04 ± 0,05
Ранок	-1,07 ± 0,06*	1,35 ± 0,05*	-0,93 ± 0,06*	0,08 ± 0,05
Види дерев				
<i>Acer saccharum</i>	-0,08 ± 0,12	-0,15 ± 0,10	-0,37 ± 0,12*	-0,23 ± 0,10*
<i>Ulmus pumila</i>	-0,08 ± 0,12	-0,18 ± 0,10	-0,73 ± 0,12*	0,19 ± 0,10
<i>Celtis occidentalis</i>	-0,07 ± 0,12	-0,10 ± 0,10	-0,64 ± 0,12*	-0,18 ± 0,10
<i>Gleditsia triacanthos</i>	0,19 ± 0,12	-0,36 ± 0,10*	-0,35 ± 0,12*	-0,54 ± 0,10*
<i>Styphnolobium japonicum</i>	0,26 ± 0,12*	-0,21 ± 0,10*	-0,28 ± 0,12*	0,04 ± 0,10
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	0,13 ± 0,12	-0,09 ± 0,10	-0,33 ± 0,12*	-0,24 ± 0,10*
<i>Robinia pseudoacacia</i>	0,11 ± 0,12	-0,21 ± 0,10*	-0,36 ± 0,12*	0,16 ± 0,10
<i>Quercus rubra</i>	-0,05 ± 0,12	-0,13 ± 0,10	-0,42 ± 0,12*	0,47 ± 0,10*
<i>Ailanthus altissima</i>	0,06 ± 0,12	-0,02 ± 0,10	-0,42 ± 0,12*	0,43 ± 0,10*
<i>Gymnocladus dioica</i>	0,03 ± 0,12	-0,11 ± 0,10	-0,07 ± 0,12	-0,15 ± 0,10
<i>Acer negundo</i>	0,16 ± 0,12	-0,21 ± 0,10*	-0,41 ± 0,12*	-0,17 ± 0,10

Примітки:

- 1 — базовим рівнем для предиктора «дата» є 06.08.2023
 2 — базовим рівнем для предиктора «час доби» є вечір
 3 — базовим видом для порівняння є *Aesculus hippocastanum*

Аналіз впливу дати дослідження показав, що показники температури та вологості за окремими датами мали статистично значущі відхилення від базового рівня. Зокрема, для температури повітря спостерігалось її зниження 13.06.2023 та 26.07.2023, тоді як для відносної вологості повітря ці дати характеризувалися підвищенням показників.

Вплив часу доби також виявився статистично значущим: у денні години температура повітря була вищою, а в ранкові — нижчою порівняно з вечірніми значеннями. Для температури ґрунту спостерігалася подібна тенденція.

Аналіз впливу видового складу показав, що різні види дерев по-різному впливають на мікрокліматичні показники. Так, деякі види сприяли зниженню температури ґрунту та підвищенню вологості, тоді як інші мали протилежний ефект.

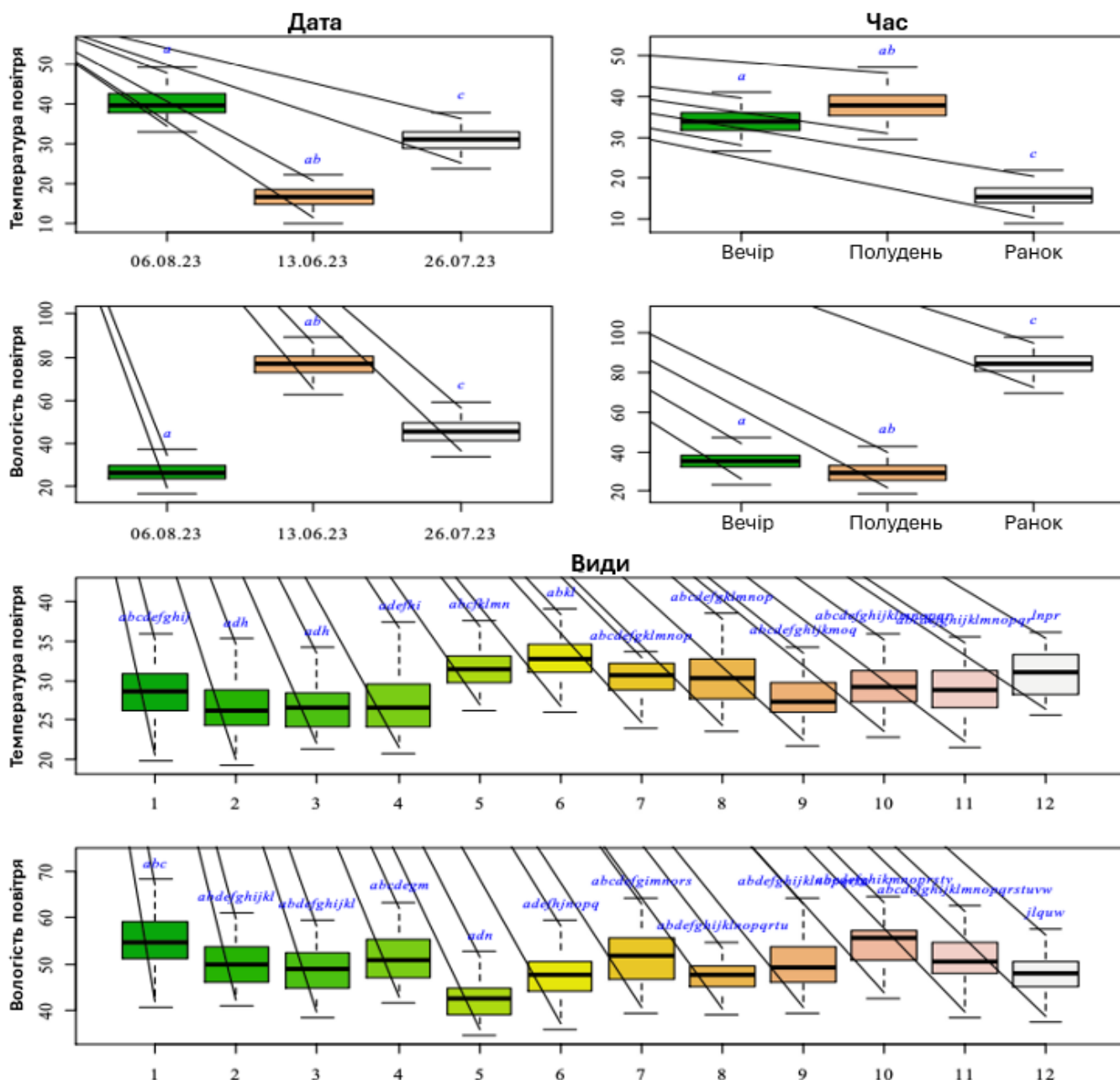


Рисунок 4.14 - Voxplot варіабельності температури повітря (АТ, °С) та відносної вологості повітря (АН, %) залежно від дати, часу доби та видів дерев. Voxplot відображає міжквартильний розмах, який охоплює перший квартиль (Q_1 , 25%) і третій квартиль (Q_3 , 75%), тоді як медіана (Q_2 , 50%) позначена лінією всередині прямокутника. «Вуса» графіка показують мінімальні та максимальні значення, що не класифікуються як викиди згідно з критерієм Тьюкі. Однакові літери позначають рівні факторів, які статистично не відрізняються між собою при рівні значущості $P < 0,05$, тоді як різні літери вказують на статистично значущі відмінності. Позначення видів: 1 — *Aesculus hippocastanum* L.; 2 — *Acer saccharum* Marshall.; 3 — *Ulmus pumila* L.; 4 — *Celtis occidentalis* L.; 5 — *Gleditsia triacanthos* L.; 6 — *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott; 7 — *Fraxinus pennsylvanica* Marshall.; 8 — *Robinia pseudoacacia* L.; 9 — *Quercus rubra* L.; 10 — *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle; 11 — *Gymnocladus dioica* (L.) K. Koch; 12 — *Acer negundo* L.

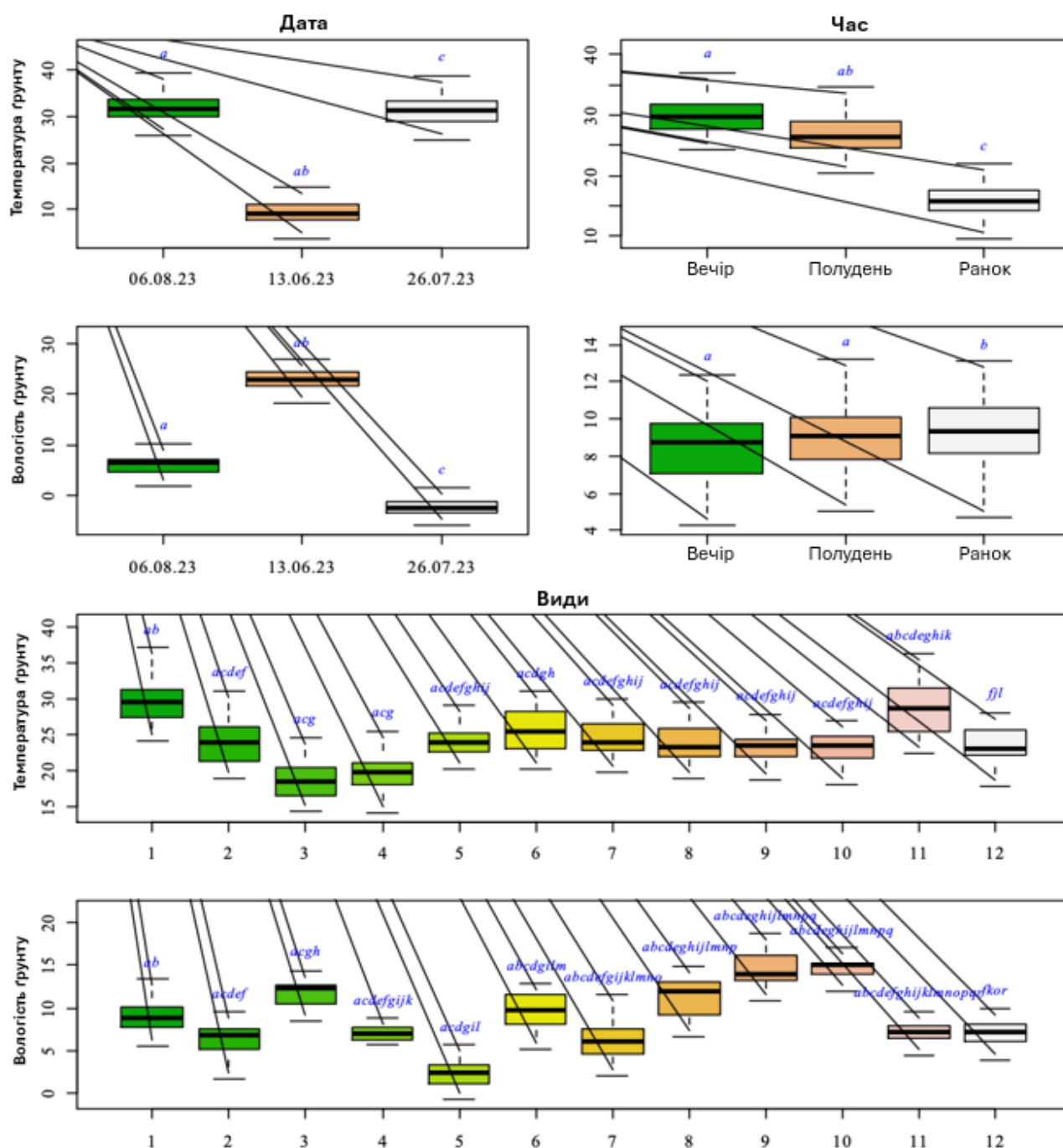


Рисунок 4.15 - Voxplot варіабельності температури ґрунту (ST, °C) та вологості ґрунту (SWC, %) залежно від дати, часу доби та видів дерев. Voxplot відображає міжквартильний розмах, що включає перший квартиль (Q₁, 25%) і третій квартиль (Q₃, 75%), при цьому медіана (Q₂, 50%) позначена лінією всередині прямокутника. «Вуса» графіка показують мінімальні та максимальні значення, які не класифікуються як викиди відповідно до критерію Тьюкі. Однакові літери позначають рівні факторів, що статистично не відрізняються між собою при рівні значущості $P < 0,05$, тоді як різні літери вказують на наявність статистично значущих відмінностей. Позначення видів: 1 — *Aesculus hippocastanum* L.; 2 — *Acer saccharum* Marshall.; 3 — *Ulmus pumila* L.; 4 — *Celtis occidentalis* L.; 5 — *Gleditsia triacanthos* L.; 6 — *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott; 7 — *Fraxinus pennsylvanica* Marshall.; 8 — *Robinia pseudoacacia* L.; 9 — *Quercus rubra* L.; 10 — *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle; 11 — *Gymnocladus dioica* (L.) K. Koch; 12 — *Acer negundo* L.

Досліджувані фактори пояснювали 78% варіації вологості ґрунту. Вологість ґрунту змінювалася в межах від $6,7 \pm 0,5\%$ до $11,0 \pm 0,6\%$. Найвищі значення вологості ґрунту спостерігалися під кронами таких видів, як *Ulmus pumila*, *Ailanthus altissima*, *Quercus rubra*, тоді як найнижчі — під кронами *Gleditsia triacanthos*, *Fraxinus pennsylvanica*, *Acer saccharum*.

Аналіз добової динаміки, міждобових відмінностей та впливу видів дерев показав, що ці фактори пояснюють 86% варіації відносного вмісту води в листках дерев (табл. 4.4).

Найнижче середнє значення відносного вмісту води становило $58,4 \pm 0,8\%$, а найвище — $76,3 \pm 0,5\%$. Найбільший відносний вміст води спостерігався в листках *Styphnolobium japonicum*, *Acer negundo*, *Ailanthus altissima*, тоді як найменший — у листках *Quercus rubra*, *Aesculus hippocastanum*, *Gleditsia triacanthos* (рис. 4.15).

Аналіз добових змін, міждобових відмінностей і впливу видів дерев показав, що ці фактори пояснюють 73% варіації водного дефіциту в листках дерев. Найнижче середнє значення водного дефіциту становило $11,2 \pm 1,2\%$, а найвище — $24,2 \pm 0,8\%$. Найбільший водний дефіцит спостерігався в листках *Fraxinus pennsylvanica*, *Aesculus hippocastanum*, *Gymnocladus dioica*, тоді як найменший — у листках *Styphnolobium japonicum*, *Celtis occidentalis*, *Ulmus pumila*.

Дискримінантний аналіз було проведено на основі параметрів середовища під кронами дерев і фізіологічних показників листків. У результаті було отримано матрицю відстаней Махаланобіса між видами дерев, на основі якої виконано кластерний аналіз (рис. 4.16).

Таблиця 4.4 - Оцінка узагальнених лінійних моделей впливу дати, часу, видів дерев, температури та вологості повітря, температури і вологості ґрунту на відносний вміст води та водний дефіцит у листках («*» — статистично значуща різниця відносно базового рівня предиктора*)

Предиктор	Відносний вміст води ($F=179,75$; $R^2=0,86$)	Водний дефіцит ($F=76,29$; $R^2=0,73$)
Дата		
13.06.2023	$0,07 \pm 0,10$	$0,05 \pm 0,14$
26.07.2023	$0,20 \pm 0,06^*$	$-0,55 \pm 0,08^*$
Час доби		
Полудень	$-0,15 \pm 0,05^*$	$0,72 \pm 0,06^*$
Ранок	$-0,13 \pm 0,08$	$-0,43 \pm 0,11^*$
Види дерев		
<i>Acer saccharum</i>	$0,55 \pm 0,09^*$	$-1,09 \pm 0,12^*$
<i>Ulmus pumila</i>	$0,77 \pm 0,09^*$	$-0,95 \pm 0,12^*$
<i>Celtis occidentalis</i>	$0,16 \pm 0,09$	$-1,23 \pm 0,12^*$
<i>Gleditsia triacanthos</i>	$0,29 \pm 0,09^*$	$-0,95 \pm 0,13^*$
<i>Styphnolobium japonicum</i>	$1,59 \pm 0,09^*$	$-1,40 \pm 0,12^*$
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	$0,33 \pm 0,09^*$	$-0,51 \pm 0,12^*$
<i>Robinia pseudoacacia</i>	$0,97 \pm 0,09^*$	$-0,85 \pm 0,12^*$
<i>Quercus rubra</i>	$-0,80 \pm 0,09^*$	$-0,54 \pm 0,12^*$
<i>Ailanthus altissima</i>	$2,08 \pm 0,09^*$	$-0,51 \pm 0,12^*$
<i>Gymnocladus dioica</i>	$0,74 \pm 0,09^*$	$0,27 \pm 0,12^*$
<i>Acer negundo</i>	$2,15 \pm 0,09^*$	$-0,98 \pm 0,12^*$
Фактори середовища		
Температура повітря	$-0,06 \pm 0,03$	$0,06 \pm 0,04$
Вологість повітря	$0,07 \pm 0,04$	$0,00 \pm 0,05$
Температура ґрунту	$-0,16 \pm 0,03^*$	$0,25 \pm 0,04^*$
Вологість ґрунту	$0,19 \pm 0,04^*$	$-0,17 \pm 0,05^*$

Примітки:

- 1 — базовим рівнем для предиктора «дата» є 06.08.2023
- 2 — базовим рівнем для предиктора «час доби» є вечір
- 3 — базовим видом для порівняння є *Aesculus hippocastanum*

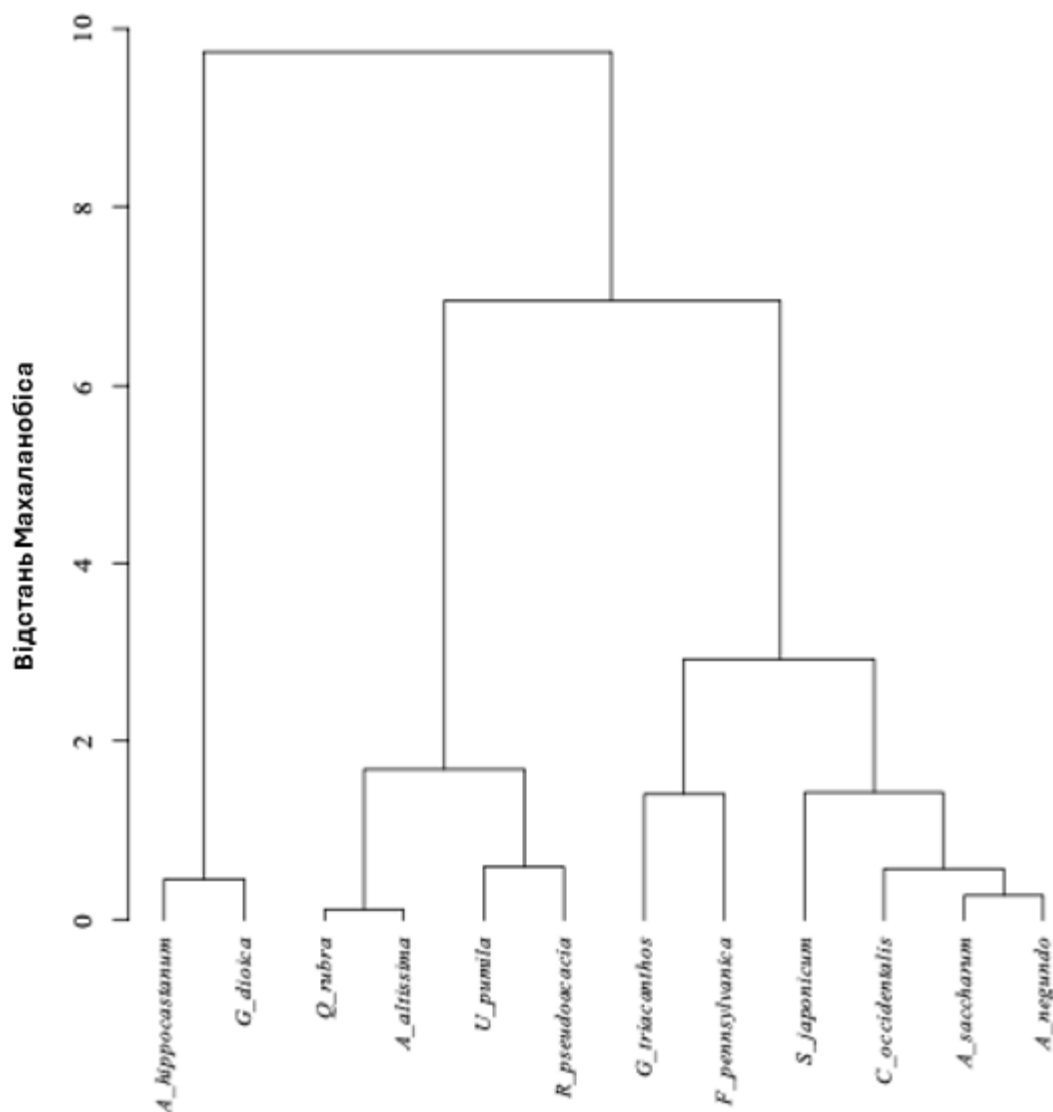


Рисунок 4.16 - Кластерний аналіз видів дерев за їх водними характеристиками та впливом на фітокліматичний режим повітря і ґрунту (з використанням відстані Махаланобіса та методу Варда). Кластер 1: *Aesculus hippocastanum* L. та *Gymnocladus dioica* (L.) K. Koch; Кластер 2: *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle, *Quercus rubra* L., *Robinia pseudoacacia* L., *Ulmus pumila* L.; Кластер 3: *Fraxinus pennsylvanica* Marshall., *Gleditsia triacanthos* L., *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott; Кластер 4: *Acer negundo* L., *Acer saccharum* Marshall., *Celtis occidentalis* L.

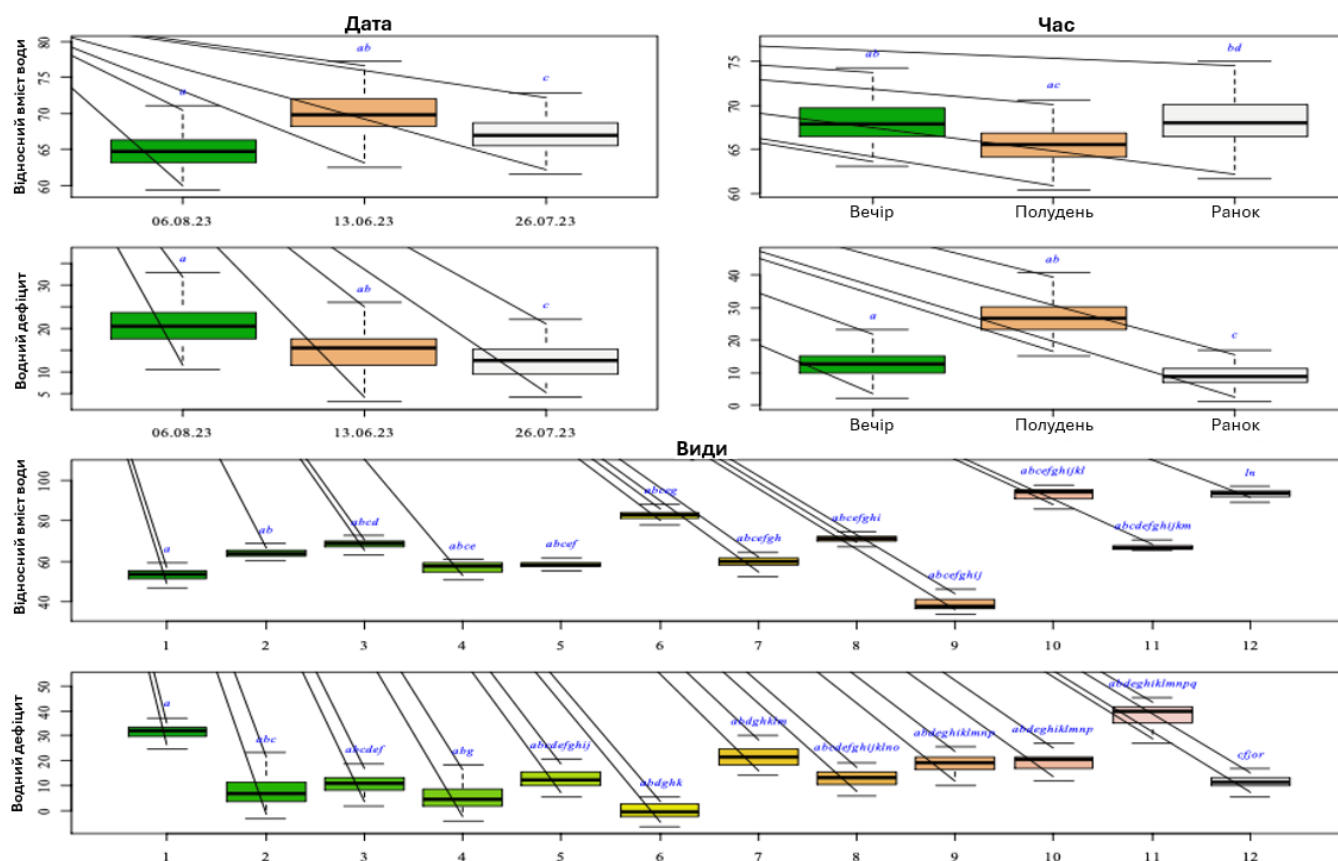


Рисунок 4.16 - Boxplot варіабельності відносного вмісту води (RWC, %) та водного дефіциту (WD, %) залежно від дати, часу доби та видів дерев із урахуванням температури повітря, вологості повітря, температури ґрунту та вологості ґрунту як ковариат. Boxplot відображає міжквартильний розмах, який включає перший квартиль (Q_1 , 25%) і третій квартиль (Q_3 , 75%), при цьому медіана (Q_2 , 50%) позначена лінією всередині прямокутника. «Вуса» графіка показують мінімальні та максимальні значення, які не класифікуються як викиди відповідно до критерію Тьюкі. Згідно з тестом Тьюкі, однакові літери позначають рівні факторів, що статистично не відрізняються між собою при рівні значущості $P < 0,05$, тоді як різні літери вказують на статистично значущі відмінності. Позначення видів: 1 — *Aesculus hippocastanum* L.; 2 — *Acer saccharum* Marshall.; 3 — *Ulmus pumila* L.; 4 — *Celtis occidentalis* L.; 5 — *Gleditsia triacanthos* L.; 6 — *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott; 7 — *Fraxinus pennsylvanica* Marshall.; 8 — *Robinia pseudoacacia* L.; 9 — *Quercus rubra* L.; 10 — *Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle; 11 — *Gymnocladus dioica* (L.) K. Koch; 12 — *Acer negundo* L.

За результатами аналізу було виділено 4 однорідні групи дерев. Кластер 3 відрізнявся від інших кластерів вищими значеннями температури повітря (planned comparison: $F = 3,7$; $P = 0,05$), тоді як між іншими кластерами достовірних відмінностей не виявлено ($F = 1,6$; $P = 0,27$).

Кластер 3 також характеризувався найнижчими значеннями вологості повітря ($F = 4,1$; $P = 0,04$), тоді як кластер 1 відзначався найвищим рівнем цього показника ($F = 4,7$; $P = 0,03$). Кластери 2 і 3 мали проміжні значення вологості повітря і статистично не відрізнялися між собою ($F = 0,4$; $P = 0,54$).

Температура ґрунту під кронами дерев кластера 1 була найвищою ($F = 32,6$; $P < 0,001$), тоді як між іншими кластерами достовірних відмінностей за цим показником не встановлено ($F = 0,2$; $P = 0,65$).

Щодо вологості ґрунту під кронами дерев, між кластерами виявлено статистично значущі відмінності ($F = 248,8$; $P < 0,001$). За рівнем вологості ґрунту кластери можна розташувати у такому порядку (від найвищого до найнижчого): кластер 2 → кластер 1 → кластер 4 → кластер 3.

Дослідження впливу крон дерев інтродукованих видів показало, що міські деревні насадження істотно впливають на мікрокліматичні параметри повітря і ґрунту. Температура повітря під кронами дерев була нижчою ($28,3$ – $30,3$ °C), тоді як відносна вологість — вищою ($47,2$ – $51,2\%$) порівняно з відкритими ділянками. У верхньому шарі ґрунту температура знижувалася з $26,0 \pm 0,9$ °C на відкритих ділянках до $22,3 \pm 0,6$ °C у затінених, тоді як його вологість зростала до $6,7$ – $11,0\%$.

Фізіологічні показники листків підтвердили міжвидові відмінності у водному статусі інтродукованих видів дерев у міських насадженнях степової зони. Відносний вміст води (RWC) змінювався в межах $58,4 \pm 0,8\%$ — $76,3 \pm 0,5\%$, тоді як водний дефіцит (WD) — від $11,2 \pm 1,2\%$ до $24,2 \pm 0,8\%$. Це свідчить про різну адаптивну здатність видів дерев до посушливих умов, що є важливим критерієм їх добору для створення зеленої інфраструктури.

За результатами GLM-аналізу встановлено достовірні міжвидові відмінності за комплексом мікрокліматичних і фізіологічних показників. Кластерний аналіз дозволив виокремити групи дерев за їх стабільністю та фітокліматичним ефектом, що

свідчить про доцільність їх комбінованого використання для підвищення екологічної стійкості зелених насаджень.

Практичне значення дослідження полягає у можливості науково обґрунтованого добору видів дерев для озеленення міст степової зони України з метою підвищення їх стійкості до кліматичних змін.

РОЗДІЛ 5 МІКРОКЛІМАТИЧНІ УМОВИ ТА ВОДНИЙ СТАТУС ЛИСТКІВ ДЕРЕВНИХ ВИДІВ У МІСЬКИХ ПАРКОВИХ ЕКОСИСТЕМАХ

5.1 Просторово-часова мінливість мікрокліматичних параметрів у насадженнях досліджуваних видів

Під час трьох періодів відбору проб температура повітря суттєво змінювалася залежно як від часу доби, так і від виду дерев (Додаток А). Найвищі температури були зафіксовані 06 серпня, коли полуденна температура повітря стабільно досягала максимальних значень для всіх видів (приблизно від середини 30-х до початку 40-х °С). Натомість 13 червня спостерігалися найнижчі загальні температури (зазвичай у межах від початку 20-х до початку 30-х °С залежно від часу доби). 26 липня температурні показники були проміжними, але також демонстрували чіткий добовий ритм, причому значення опівдні були, як правило, вищими, ніж вранці та ввечері. У межах кожної комбінації «дата × час доби» види часто розподілялися на окремі групи за результатами post-hoc тесту Тьюкі, що свідчить про наявність статистично значущих міжвидових відмінностей у мікрокліматичних умовах на момент відбору проб, навіть за однакової дати та однакового періоду доби.

Відносна вологість повітря демонструвала виражену добову та міждобову мінливість і відрізнялася між видами в межах одного й того ж інтервалу вимірювань (Додаток Б). Загалом вологість була найвищою вранці та зменшувалася до полудня і вечора, причому найконтрастніші відмінності спостерігалися 13 червня, коли ранкові значення зазвичай становили 60–75% у різних видів, а опівдні знижувалися приблизно до 45–55%. 06 серпня та 26 липня вологість опівдні зазвичай була найнижчою (часто близько 30–45%), після чого частково відновлювалася до вечора залежно від виду. У межах кожної комбінації «Дата × Період доби» види часто формували окремі групи за результатами post-hoc тесту Tukey, що свідчить про статистично значущі міжвидові відмінності мікрокліматичних умов вологості, зафіксованих під час відбору проб.

Протягом трьох дат відбору проб температура ґрунту демонструвала чітку добову та сезонну мінливість і відрізнялася між досліджуваними видами дерев (Додаток В). Загалом найвищі значення спостерігалися вранці та опівдні 06 серпня (приблизно від середини 20-х до початку 30-х °C), проміжні значення — 26 липня, а найнижчі — 13 червня (приблизно від середини підліткових значень до початку 20-х °C). У межах кожної комбінації «Дата × Період доби» види часто формували окремі групи за результатами *post-hoc* тесту Tukey, що свідчить про неоднорідність температурних умов у кореневій зоні між видами навіть тоді, коли вимірювання проводилися в той самий час і дату.

Вологість ґрунту поведилася суттєво інакше порівняно з атмосферними показниками (Додаток Г). На відміну від плавного добового циклу, вона визначалась переважно датою відбору проб, тоді як вплив часу доби ставав помітним лише за більш сухих умов. Червнева кампанія (13.06) вирізнялася найвищим рівнем вологості, при цьому багато видів демонстрували відносно високі значення і, для кількох таксонів, чітке зростання показників від полудня до вечора (часто від середини підліткових значень до понад 20%). Натомість у липні (26.07) та серпні (06.08) ґрунт був значно сухішим: для багатьох видів вологість часто знижувалася до однозначних значень, а мінімальні показники зазвичай спостерігалися опівдні. Важливо, що види реагували неоднаково: навіть у межах тієї самої дати та періоду доби деякі види стабільно належали до груп із вищою вологістю, ніж інші, що підтверджується групуванням за літерними індексами. Це свідчить про видоспецифічні відмінності мікросередовища та вплив розміщення дерев у межах парків.

Отримані результати свідчать про виражену просторово-часову мінливість основних мікрокліматичних параметрів у насадженнях досліджуваних деревних видів. Температура повітря і ґрунту демонструвала чітку добову та сезонну динаміку з максимальними значеннями у серпні та в полуденний період, тоді як відносна вологість повітря, навпаки, була найвищою у ранкові години та знижувалася протягом дня. Вологість ґрунту характеризувалася переважно сезонною мінливістю і значною міжвидовою неоднорідністю, що відображає відмінності у мікросередовищі та умовах зволоження кореневої зони.

У межах однакових періодів спостережень виявлено статистично значущі міжвидові відмінності для всіх досліджуваних мікрокліматичних показників, що підтверджує наявність видоспецифічних особливостей формування мікроклімату в міських паркових екосистемах. Таким чином, мікрокліматичні умови в урбанізованому середовищі формуються під впливом як часових (сезонних і добових), так і біотичних (видоспецифічних) факторів, що створює неоднорідне середовище функціонування деревних рослин.

5.2 Міжвидові особливості та динаміка індексів водного статусу листків

Вміст води (WC, %) демонстрував стабільні міжвидові відмінності, які зберігалися незалежно від дати та часу доби (табл. 5.5). Найвищі значення WC зазвичай реєструвалися у *Robinia pseudoacacia* та *Styphnolobium japonicum*, які неодноразово формували верхні групи в різних комбінаціях «Дата × Час доби». Натомість *Quercus rubra* (а також часто *Fraxinus pennsylvanica*) займали нижні позиції в діапазоні значень WC, характеризуючись відносно нижчим вмістом води в листках за тих самих умов відбору проб.

Кілька видів демонстрували проміжний характер (наприклад, *Acer spp.*, *Celtis occidentalis*, *Gymnocladus dioica* та *Ulmus pumila*), однак їхні позиції в ранжуванні іноді змінювалися залежно від дати відбору та періоду доби. Групування за літерними

індексами свідчить, що ці відмінності були не лише описовими, а й часто статистично підтвердженими в межах окремих часових інтервалів вимірювання.

Відносний вміст води (RWC, %) виявив міжвидові відмінності у гідратації листків, враховуючи варіації їхньої структури та водоутримувальної здатності шляхом нормалізації до стану повного тургору (табл. 5.5). Порівняно з показником WC, цей індекс зміщує акцент із абсолютного вмісту води на ступінь гідратації відносно максимального можливого значення для кожного виду, тим самим зменшуючи вплив природно товстіших або щільніших листків і роблячи міжвидові порівняння більш фізіологічно обґрунтованими.

У цьому контексті кілька видів стабільно підтримували високі значення RWC незалежно від дати та часу доби (наприклад, *Styphnolobium japonicum* і *Robinia pseudoacacia*, які часто залишалися у верхніх статистичних групах). Натомість інші види частіше перебували у проміжних або нижчих станах гідратації в межах тих самих часових інтервалів вимірювання (наприклад, *Ailanthus altissima*, *Fraxinus pennsylvanica*, а іноді й *Gymnocladus dioica*).

Примітно, що деякі види, які виглядали відносно «водонасиченими» за абсолютними показниками, не завжди займали такі ж позиції за RWC. Це свідчить про те, що види відрізняються не лише загальним вмістом води в листках, але й тим, наскільки близько їхні листки перебувають до стану повного тургору в умовах міського мікроклімату.

Аналіз показників водного статусу листків засвідчив наявність стабільних і статистично значущих міжвидових відмінностей як для абсолютного вмісту води (WC), так і для відносного вмісту води (RWC). Види *Styphnolobium japonicum* та *Robinia pseudoacacia* характеризувалися стабільно високими значеннями обох показників, що свідчить про їхню підвищену здатність підтримувати водний баланс у міських умовах. Натомість такі види, як *Ailanthus altissima*, *Fraxinus pennsylvanica* та *Gymnocladus dioica*, частіше демонстрували нижчі або проміжні значення гідратації, що може відображати їхню меншу адаптивність до водного стресу.

Показник WC відображає абсолютний вміст води у тканинах листків, тоді як RWC є більш інформативним індикатором фізіологічного стану рослин, оскільки

характеризує рівень гідратації відносно стану повного тургору. Виявлені розбіжності між ранжуванням видів за WC і RWC підтверджують, що водний статус визначається не лише загальним вмістом води, але й видоспецифічними фізіологічними механізмами її утримання.

Таким чином, водний статус листків у міських паркових екосистемах має виражений видоспецифічний характер і відображає адаптивні стратегії деревних видів щодо підтримання гідратації в умовах урбанізованого середовища.

5.3 Вплив мікрокліматичних факторів на показники водного статусу листків за результатами моделей зі змішаними ефектами

Моделі зі змішаними ефектами показали, що обидва індекси водного стану листків реагували на різні компоненти мікрокліматичного середовища (табл. 5.5). Для показника WC найсильнішими та найбільш стабільними джерелами варіації були видові особливості ($\chi^2 = 280.99$, $p < 0.001$) та час доби ($\chi^2 = 26.61$, $p < 0.001$), що свідчить про значні міжвидові відмінності абсолютного вмісту води в листках і його зміну протягом добового циклу. Серед безперервних коваріат температура повітря була позитивно пов'язана з WC ($\chi^2 = 8.33$, $p = 0.004$), тоді як температура ґрунту виявила слабший, але статистично значущий негативний вплив ($\chi^2 = 4.97$, $p = 0.025$). Натомість відносна вологість повітря, вологість ґрунту та дата відбору проб не мали статистично значущого внеску у варіацію WC в цій моделі (усі $p > 0.40$ для вологості повітря та ґрунту; для дати $p = 0.819$).

Таблиця 5.5 – Результати тестів χ^2 Вальда типу II для фіксованих ефектів у лінійній моделі зі змішаними ефектами, що прогнозує вміст води в листках (WC/RWC)

Фактор	WC (вміст води)			RWC (відносний вміст води)		
	χ^2	df	p-значення	χ^2	df	p-значення
Температура повітря	8.332	1	0.004	0.000	1	0.987
Відносна вологість повітря	0.692	1	0.405	3.108	1	0.078
Температура ґрунту	4.967	1	0.025	0.351	1	0.553
Вологість ґрунту	0.490	1	0.483	17.092	1	<0.001
Дата відбору проб	0.399	2	0.819	12.224	2	0.002
Час доби	26.609	2	<0.001	39.303	2	<0.001
Вид	280.986	11	<0.001	115.103	11	<0.001

Для показника RWC структура впливів зміщувалася в бік факторів, більш безпосередньо пов'язаних із гідратацією рослин відносно стану повного тургору. Вид залишався високозначущим фактором ($\chi^2 = 115.10$, $p < 0.001$), а час доби також мав сильний вплив ($\chi^2 = 39.30$, $p < 0.001$), що вказує на стійкі міжвидові відмінності відносної гідратації та її добову динаміку. На відміну від WC, вологість ґрунту виявилася ключовим предиктором RWC ($\chi^2 = 17.09$, $p < 0.001$), що свідчить про визначальну роль доступності ґрунтової води у підтриманні тургорного стану листків. Дата відбору проб також була статистично значущою для RWC ($\chi^2 = 12.22$, $p = 0.002$), що відповідає сезонним змінам доступності води та атмосферного попиту.

Для порівняння, температура повітря та температура ґрунту не були значущими предикторами RWC (відповідно $p = 0.987$ і 0.553), тоді як відносна вологість повітря виявила лише слабку тенденцію до впливу ($p = 0.078$).

Вміст води в листках (WC) значно варіював між видами та демонстрував систематичні добові відмінності. Лінійна змішана модель (табл. 5.6) показала

значущий позитивний зв'язок між WC та температурою повітря (Estimate = 0,143; $p < 0,001$), тоді як температура ґрунту була негативно пов'язана з WC (Estimate = -0,131; $p = 0,026$). Натомість відносна вологість повітря та вологість ґрунту не мали значущого фіксованого впливу на WC у цій моделі ($p > 0,40$). Вплив дати відбору проб був слабким ($p > 0,52$), тоді як час доби демонстрував тенденцію до зниження WC опівдні порівняно з референтним періодом (ранок), хоча ці відмінності були гранично значущими ($p \approx 0,07-0,08$). Видова належність пояснювала значну частину залишкової варіації, причому кілька таксонів суттєво відрізнялися від референтного виду (*Acer negundo*), демонструючи як вищі, так і нижчі значення WC.

Таблиця 5.6 - Фіксовані ефекти (LMM) для вмісту води в листках (WC). Оцінені коефіцієнти фіксованих ефектів (Estimate $\pm$ SE), ступені свободи, t-значення та p-значення з лінійної змішаної моделі, яка прогнозує WC на основі атмосферних і ґрунтових змінних, дати відбору проб, часу доби та виду, з включенням TreeID як випадкового перехоплення.

Фактор	Оцінка	Стандартна похибка	Ступені свободи	t-значення	p-значення
Константа (Intercept)	59.682	2.613	836.75	22.84	P-value
Температура повітря	0.143	0.050	843.83	2.89	< 0.001
Відносна вологість повітря	0.024	0.029	843.13	0.83	0.004
Температура ґрунту	-0.131	0.059	840.81	-2.23	0.406
Вологість ґрунту	-0.044	0.063	823.40	-0.70	0.026
Дата 13.06.23	0.274	0.435	839.73	0.63	0.484
Дата 26.07.23	-0.319	0.618	840.68	-0.52	0.529
Полудень (Midday)	-0.894	0.497	840.99	-1.80	0.606
Ранок (Morning)	-0.659	0.371	834.40	-1.78	0.073
<i>Acer saccharum</i>	4.195	0.725	35.88	5.78	0.076
<i>Aesculus hippocastanum</i>	-1.201	0.730	36.80	-1.65	< 0.001
<i>Ailanthus altissima</i>	-1.677	0.734	37.65	-2.28	0.108

<i>Celtis occidentalis</i>	0.641	0.742	39.35	0.86	0.028
<i>Fraxinus pennsylvanica</i>	-2.565	0.731	37.03	-3.51	0.393
<i>Gleditsia triacanthos</i>	-3.329	0.725	35.78	-4.59	0.001
<i>Gymnocladus dioica</i>	-2.906	0.736	38.10	-3.95	< 0.001
<i>Quercus rubra</i>	3.808	0.727	36.28	5.24	0.000
<i>Robinia pseudoacacia</i>	-6.179	0.726	36.00	-8.51	< 0.001
<i>Styphnolobium japonicum</i>	4.871	0.729	36.52	6.68	< 0.001
<i>Ulmus pumila</i>	5.870	0.731	36.88	8.03	< 0.001

Ці міжвидові закономірності узгоджуються з розподілом значень WC, представленим на діаграмах типу boxplot (рис. 5.1). Види групувалися у чітко відокремлені групи за результатами post-hoc аналізу, при цьому відносно високі значення WC спостерігалися у *Robinia pseudoacacia* та *Styphnolobium japonicum* (верхні літерні групи). Натомість *Quercus rubra* демонстрував найнижчі значення WC серед усіх спостережень (найнижча група).

Кілька видів характеризувалися проміжними рівнями (наприклад, *Acer* spp., *Celtis occidentalis*, *Gymnocladus dioica* та *Ulmus pumila*). Водночас вони формували статистично відокремлені групи, що свідчить про те, що виявлені відмінності були не лише описовими, але й статистично підтвердженими порівняннями з поправкою Tukey.

Загалом, сукупні результати, отримані на основі оцінок моделі та розподілів boxplot, свідчать про те, що вміст води в листках (WC) визначається насамперед видоспецифічними особливостями та добовими умовами, а також демонструє додаткову чутливість до термічних характеристик мікроклімату (температури повітря та ґрунту) в умовах міських паркових екосистем.

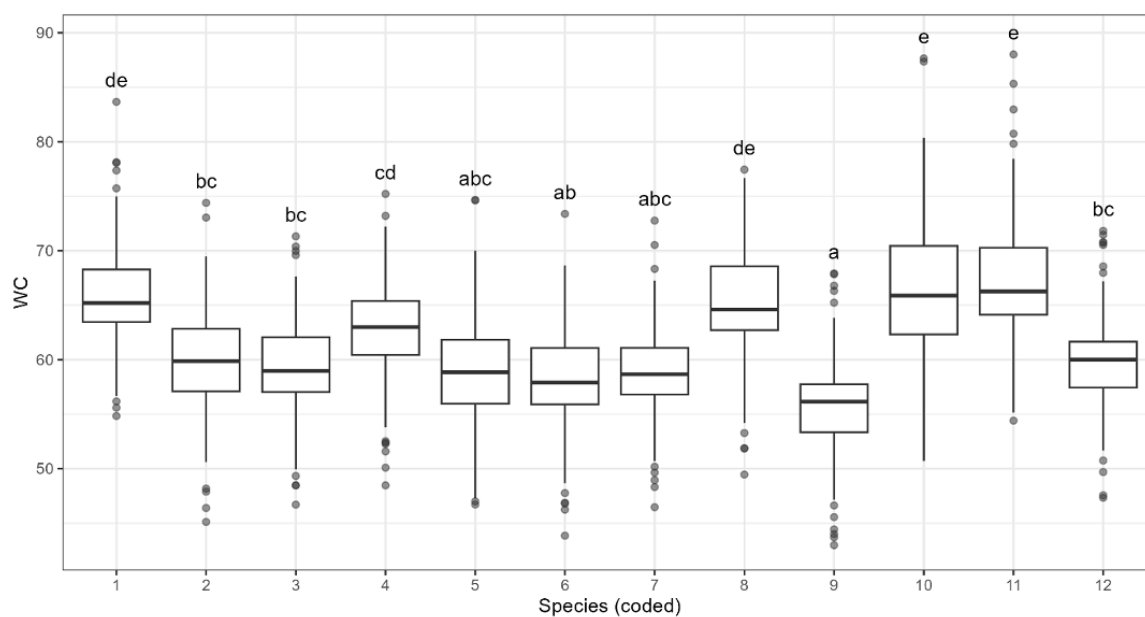


Рисунок 5.1 - Boxplot-діаграми вмісту води в листках (WC, %) для різних видів дерев. Прямокутники відображають міжквартильний розмах (IQR) з медіаною у центрі; «вуса» простягаються до $1,5 \times \text{IQR}$, а точки представляють викиди. Літери над прямокутниками позначають групи, визначені за результатами post-hoc тесту Tukey HSD на основі моделі змішаних ефектів; види, що мають хоча б одну спільну літеру, не відрізняються статистично значуще ($\alpha = 0,05$). Коди видів дерев: 1 — *Acer negundo*; 2 — *Acer saccharum*; 3 — *Aesculus hippocastanum*; 4 — *Ailanthus altissima*; 5 — *Celtis occidentalis*; 6 — *Fraxinus pennsylvanica*; 7 — *Gleditsia triacanthos*; 8 — *Gymnocladus dioica*; 9 — *Quercus rubra*; 10 — *Robinia pseudoacacia*; 11 — *Styphnolobium japonicum*; 12 — *Ulmus pumila*.

Для відносного вмісту води (RWC) модель змішаних ефектів (табл. 5.7) вказує на інший набір визначальних чинників порівняно з WC. Найсильнішим екологічним фактором була вологість ґрунту, яка продемонструвала виражений позитивний вплив на RWC (Estimate = 0.348, $p < 0.001$), що свідчить про те, що листки залишалися ближчими до стану повного тургору за умов більш зволоженого ґрунту.

На відміну від цього, температура повітря та температура ґрунту не були статистично значущими предикторами RWC ($p = 0.987$ та 0.553 відповідно), тоді як відносна вологість повітря проявила лише слабку, гранично значущу тенденцію ($p = 0.078$).

Показник RWC також залежав від дати відбору проб, з вираженням зниженням 13.06 (Estimate = -1.961 , $p < 0.001$) та менш значним підвищенням 26.07 відносно референтної дати (Estimate = 1.644 , $p = 0.048$).

Також було виявлено відмінності залежно від часу доби, зокрема значну зміну у ранковий період ($p < 0.001$), що узгоджується з добовими коливаннями водного статусу рослин.

Таблиця 5.7 - Фіксовані ефекти (LMM) для відносного вмісту води в листках (RWC). Оцінені коефіцієнти фіксованих ефектів (Estimate $\pm$ SE), ступені свободи, t-значення та p-значення, отримані з лінійної моделі змішаних ефектів, що прогнозує RWC на основі атмосферних і ґрунтових показників, дати відбору проб, часу доби та виду рослин, при цьому TreeID включено як випадковий перехоплювач.

Фактор	Оцінка	Стандартна похибка	Ступені свободи	t-значення	p-значення
Константа (Intercept)	78.311	3.503	836.58	22.36	<0.001
Температура повітря	0.001	0.066	843.80	0.02	0.987
Відносна вологість повітря	0.067	0.038	843.19	1.76	0.078
Температура ґрунту	-0.047	0.079	840.67	-0.59	0.553
Вологість ґрунту	0.348	0.084	823.55	4.13	<0.001
Дата 13.06.23	-1.961	0.583	839.84	-3.36	<0.001
Дата 26.07.23	1.644	0.829	840.78	1.98	0.048
Полудень (Midday)	0.656	0.667	841.09	0.98	0.325
Ранок (Morning)	-2.374	0.498	834.54	-4.77	<0.001
Acer saccharum	1.502	0.970	36.02	1.55	0.130
Aesculus hippocastanum	2.214	0.976	36.94	2.27	0.029
Ailanthus altissima	-2.161	0.982	37.80	-2.20	0.034
Celtis occidentalis	-4.782	0.993	39.51	-4.82	<0.001
Fraxinus pennsylvanica	-1.281	0.977	37.18	-1.31	0.198
Gleditsia triacanthos	-1.338	0.969	35.91	-1.38	0.176

<i>Gymnocladus dioica</i>	-3.497	0.984	38.25	-3.55	0.001
<i>Quercus rubra</i>	-2.083	0.972	36.41	-2.14	0.039
<i>Robinia pseudoacacia</i>	-1.156	0.970	36.13	-1.19	0.241
<i>Styphnolobium japonicum</i>	5.161	0.974	36.66	5.30	<0.001
<i>Ulmus pumila</i>	5.775	0.977	37.02	5.91	<0.001

Ці закономірності узгоджуються з розподілом даних (рис. 5.2), у якому види формують чіткі групи *post hoc* і відрізняються не лише за центральною тенденцією, але й за варіабельністю. Декілька видів стабільно займали вищий діапазон значень RWC (верхні літерні групи). Натомість інші види групувалися в нижчих групах, що свідчить про видоспецифічну здатність підтримувати гідратацію листків за однакових умов урбаністичного мікроклімату. Важливо, що на відміну від WC, показник RWC акцентує увагу на рівні гідратації відносно повністю тургорного стану кожного виду, що дозволяє розрізняти «водонасичені листки» та «добре гідратовані листки». Таким чином, ранжування видів відображає відмінності у здатності підтримувати тургор, а не лише абсолютну масу води в листках.

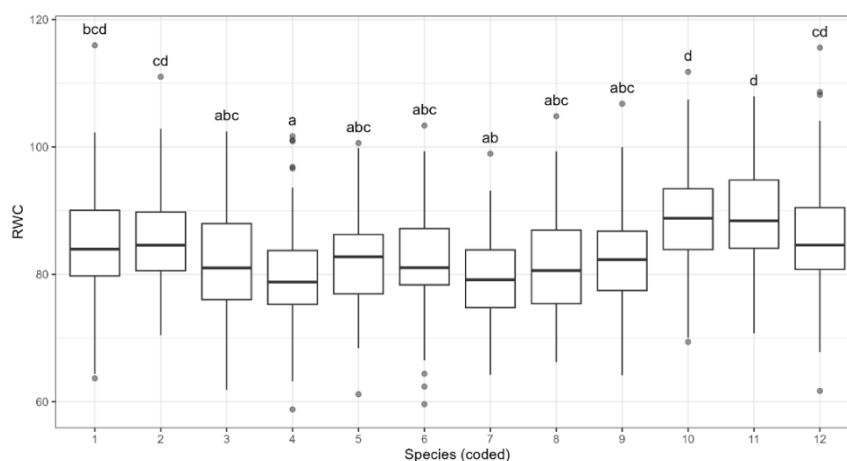


Рисунок 5.2 - Діаграми розмаху (boxplot) відносного вмісту води в листках (RWC) у різних видів дерев (%). Прямокутники відображають міжквартильний розмах (IQR) з медіанною лінією; «вуса» простягаються до $1,5 \times \text{IQR}$, а точки позначають викиди. Літери над прямокутниками вказують на групи, визначені *post hoc* тестом Tukey HSD на основі моделі змішаних ефектів; види, що мають принаймні одну спільну літеру, не відрізняються статистично значуще ($\alpha = 0,05$). Коди видів дерев: 1 — *Acer negundo*; 2 — *Acer saccharum*; 3 — *Aesculus hippocastanum*; 4 — *Ailanthus altissima*; 5 — *Celtis occidentalis*; 6 — *Fraxinus pennsylvanica*; 7 — *Gleditsia triacanthos*; 8 — *Gymnocladus dioica*; 9 — *Quercus rubra*; 10 — *Robinia pseudoacacia*; 11 — *Styphnolobium japonicum*; 12 — *Ulmus pumila*.

Результати моделювання засвідчили, що показники водного статусу листків визначаються різними наборами екологічних і біологічних факторів. Для абсолютного вмісту води (WC) основними детермінантами були видова належність, час доби та температура повітря, що підтверджує значну роль фізіологічних особливостей видів і добових термічних умов у регуляції водного балансу листків. Негативний зв'язок WC із температурою ґрунту свідчить про можливий вплив термічного стресу в кореневій зоні на водний стан рослин.

На відміну від WC, відносний вміст води (RWC) найбільшою мірою залежав від вологості ґрунту, що підтверджує ключову роль доступності водних ресурсів у підтриманні тургорного стану листків. Видова належність і час доби також залишалися важливими чинниками, тоді як температура повітря і ґрунту не мали статистично значущого впливу на цей показник.

Отримані результати свідчать, що WC переважно відображає структурно-фізіологічні особливості листків і реакцію на термічні умови, тоді як RWC є більш чутливим індикатором водного забезпечення рослин і доступності ґрунтової вологи. Таким чином, водний статус листків у міських паркових екосистемах формується під впливом комплексної взаємодії видоспецифічних властивостей і мікрокліматичних факторів, серед яких провідну роль відіграють доступність ґрунтової вологи та добова динаміка умов середовища.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання щодо встановлення особливостей впливу інтродукованих видів дерев на формування мікрокліматичних параметрів зелених насаджень урбанізованого середовища, що дозволило отримати такі результати:

З'ясовано особливості впливу інтродукованої дендрофлори на мікрокліматичні параметри ґрунту (температура та вологість) паркової екосистеми.

З'ясовано особливості інтродукованої дендрофлори на мікрокліматичні параметри приземного шару повітря (температура та вологість) паркової екосистеми

Встановлено, що інтродуковані види дерев суттєво трансформують мікрокліматичні умови у межах паркових екосистем. Під кронами формуються знижені температури ґрунту і повітря та підвищена вологість порівняно з відкритими ділянками. Виявлено, що ці зміни зумовлені затіненням, зменшенням інсоляції та особливостями водообміну, а їх інтенсивність має виражений видоспецифічний характер і залежить від структури крони.

Проаналізовано сезонну динаміку мікрокліматичних параметрів ґрунту та приземного шару повітря під кронами різних видів інтродукованих видів дерев

Доведено, що температурні та вологісні показники ґрунту і повітря характеризуються вираженою сезонною та добовою мінливістю з максимальними значеннями температур у літній період і їх зниженням наприкінці вегетаційного сезону. Встановлено, що амплітуда і характер змін істотно відрізняються між видами дерев, що свідчить про їх різну здатність модифікувати мікроклімат у часі.

Встановлено особливості параметрів вмісту води у листках різних інтродукованих видів дерев у міських паркових екосистемах.

Встановлено, що вміст води в листках і показники відносного вмісту води (RWC) характеризуються значною міжвидовою та часовою мінливістю. Виявлено, що

досліджувані види відрізняються за рівнем адаптації до умов міського середовища та ефективністю регуляції водного режиму листкового апарату.

Доведено, що показники водного статусу листків достовірно залежать від параметрів підкранового мікроклімату. Види, які формують більш зволене та температурно стабільне середовище, характеризуються вищими значеннями RWC. На основі багатовимірної статистичної аналізи встановлено, що мікроклімат формується як результат комплексної взаємодії абіотичних факторів, видових особливостей дерев і часових змін.

Проаналізовано особливості параметрів відносного вмісту води в листках різних інтродукованих видів дерев у міських паркових екосистемах

Отримані результати свідчать, що інтродуковані види дерев відіграють ключову роль у формуванні мікрокліматичних умов урбанізованого середовища, виступаючи ефективними природними регуляторами температурного та водного режимів у межах зелених насаджень. Їх вплив реалізується через поєднання затінювального ефекту, інтенсивності транспірації та особливостей просторової організації крони, що забезпечує зниження температурних екстремумів, підвищення відносної вологості та стабілізацію умов зволення ґрунту. Встановлено, що характер і сила цього впливу мають виражену видоспецифічність, що визначає різну ефективність досліджуваних видів у формуванні сприятливого підкранового середовища та підтриманні оптимального водного статусу рослин. Доведено тісний функціональний зв'язок між мікрокліматичними параметрами та фізіологічним станом дерев, що відображає їх адаптаційні можливості в умовах міського середовища. Отримані закономірності мають важливе наукове та практичне значення і можуть бути використані для обґрунтування підбору видового складу зелених насаджень, спрямованого на підвищення екологічної ефективності, стійкості та кліматорегулювальної ролі урбанізованих екосистем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Tzoulas K., Korpela K., Venn S. et al. Promoting ecosystem and human health in urban areas using green infrastructure: a literature review // *Landscape and Urban Planning*. 2007. Vol. 81. P. 167–178.
2. Bolund P., Hunhammar S. Ecosystem services in urban areas // *Ecological Economics*. 1999. Vol. 29. P. 293–301.
3. Benedict M. A., McMahon E. T. Green infrastructure: linking landscapes and communities. Washington: Island Press, 2006. 320 p.
4. Nowak D. J., Crane D. E. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA // *Environmental Pollution*. 2002. Vol. 116. P. 381–389.
5. Escobedo F. J., Nowak D. J. Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest // *Landscape and Urban Planning*. 2009. Vol. 90. P. 102–110.
6. Beckett K. P., Freer-Smith P. H., Taylor G. Urban woodlands: their role in reducing particulate pollution // *Environmental Pollution*. 1998. Vol. 99. P. 347–360.
7. Yang J., McBride J., Zhou J., Sun Z. The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2005. Vol. 3. P. 65–78.
8. Niemelä J. Urban ecology: patterns, processes, and applications. Oxford: Oxford University Press, 2011. 374 p.
9. Elmqvist T. et al. Urbanization, biodiversity and ecosystem services: challenges and opportunities. Dordrecht: Springer, 2013. 755 p.
10. Oke T. R. The energetic basis of the urban heat island // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 1982. Vol. 108. P. 1–24.
11. Bowler D. E. et al. Urban greening to cool towns and cities: a systematic review // *Landscape and Urban Planning*. 2010. Vol. 97. P. 147–155.
12. Santamouris M. Heat island research in Europe // *Advances in Building Energy Research*. 2007. Vol. 1. P. 123–150.
13. Gill S. E. et al. Adapting cities for climate change: the role of green infrastructure // *Built Environment*. 2007. Vol. 33. P. 115–133.
14. Heisler G. M. Effects of individual trees on the solar radiation climate of

small buildings // *Urban Ecology*. 1986. Vol. 9. P. 337–359.

15. Xiao Q., McPherson E. G. Rainfall interception by Santa Monica's urban forest // *Urban Ecosystems*. 2002. Vol. 6. P. 291–302.

16. Fang C., Ling D. Investigation of the noise reduction provided by tree belts // *Landscape and Urban Planning*. 2003. Vol. 63. P. 187–195.

17. Dadvand P. et al. Green spaces and general health: roles of mental health status, social support, and physical activity // *Environmental Health Perspectives*. 2012. Vol. 120. P. 1–6.

18. Armson D., Stringer P., Ennos A. R. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2012. Vol. 11. P. 245–255.

19. Hartig T. et al. Nature and health // *Annual Review of Public Health*. 2014. Vol. 35. P. 207–228.

20. Maas J. et al. Green space, urbanity, and health // *Journal of Epidemiology & Community Health*. 2006. Vol. 60. P. 587–592.

21. Chiesura A. The role of urban parks for the sustainable city // *Landscape and Urban Planning*. 2004. Vol. 68. P. 129–138.

22. Dinsmore K. J., Billett M. F., Moore T. R. Transport of carbon dioxide and methane through the soil–water–atmosphere system in a peatland // *Hydrological Processes*. 2008. Vol. 22. P. 1–10.

23. Akbari H. Shade trees reduce building energy use // *Energy and Buildings*. 2002. Vol. 34. P. 1–10.

24. Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystems and human well-being*. Washington: Island Press, 2005.

25. Kabisch N., Qureshi S., Haase D. Human–environment interactions in urban green spaces // *Landscape and Urban Planning*. 2015. Vol. 133. P. 1–11.

26. Kabisch N. et al. *Nature-based solutions to climate change adaptation in urban areas*. Cham: Springer, 2017.

27. IPCC. *Climate change 2022: impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

28. Shashua-Bar L., Pearlmutter D., Erell E. The cooling efficiency of urban landscape strategies // *Landscape and Urban Planning*. 2011. Vol. 100. P. 1–12.
29. Ziter C. D. et al. Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce urban heat // *PNAS*. 2019. Vol. 116. P. 7575–7580.
30. Oke T. R., Mills G., Christen A., Voogt J. *Urban climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
31. Yu Z. et al. How can urban green spaces be planned for climate adaptation? // *Ecological Indicators*. 2017. Vol. 72. P. 1–9.
32. Rahman M. A. et al. Vertical air temperature gradients under urban trees // *Science of the Total Environment*. 2018. Vol. 633. P. 100–109.
33. Ng E. et al. Improving the wind environment in high-density cities // *Building and Environment*. 2011. Vol. 46. P. 1–11.
34. Lindberg F., Grimmond C. Nature of vegetation and building morphology // *Urban Climate*. 2011. Vol. 1. P. 1–15.
35. Frantzeskaki N. et al. Nature-based solutions for urban climate resilience // *Ambio*. 2019. Vol. 48. P. 1–13.
36. European Commission. *Evaluating the impact of nature-based solutions*. Brussels, 2021.
37. Livesley S. J. et al. The urban forest and ecosystem services // *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 159. P. 1–10.
38. Richardson D. M. et al. Naturalization and invasion of alien plants // *Diversity and Distributions*. 2000. Vol. 6. P. 93–107.
39. Blackburn T. M. et al. A unified classification of alien species // *Trends in Ecology & Evolution*. 2011. Vol. 26. P. 333–339.
40. Sjöman H., Hirons A., Bassuk N. Urban forest resilience through tree selection // *Arboriculture & Urban Forestry*. 2018. Vol. 44. P. 1–10.
41. Rahman M. A. et al. Traits of trees for cooling urban heat islands: a meta-analysis // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020. Vol. 47. P. 126521.

42. Pickett S. T. A. et al. Urban ecological systems: scientific foundations and a decade of progress // *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 2011. Vol. 42. P. 1–25.
43. Esperon-Rodriguez M. et al. Climate change increases vulnerability of urban forests // *Global Change Biology*. 2022. Vol. 28. P. 1–15.
44. Aronson M. F. J. et al. Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management // *Proceedings of the Royal Society B*. 2014. Vol. 281.
45. Gaertner M. et al. Managing invasive species in cities: a framework from Cape Town // *Landscape and Urban Planning*. 2017. Vol. 151. P. 1–9.
46. Pouyat R. V. et al. Urban soils and ecosystem services // *Urban Ecosystems*. 2010. Vol. 13. P. 1–16.
47. Caplan J. S. et al. Urban tree growth and ecosystem services // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2019. Vol. 41. P. 1–10.
48. Rahman M. A. et al. Comparing cooling effects of urban tree species // *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 757. P. 143916.
49. Kendal D. et al. Urban forest diversity and resilience // *Landscape and Urban Planning*. 2014. Vol. 123. P. 1–10.
50. Oke T. R. *Urban climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 546 p.
51. Grimmond S. Urbanization and global environmental change: local effects of urban warming // *Geographical Journal*. 2007. Vol. 173. P. 83–88.
52. Landsberg H. *The urban climate*. New York: Academic Press, 1981. 275 p.
53. Stewart I. D., Oke T. R. Local climate zones for urban temperature studies // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2012. Vol. 93. P. 1879–1900.
54. Santamouris M. Cooling the cities – a review of reflective and green roof mitigation technologies // *Solar Energy*. 2014. Vol. 103. P. 682–703.
55. Emmanuel R. *An urban approach to climate-sensitive design*. London: Routledge, 2012. 274 p.
56. Shashua-Bar L., Hoffman M. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street // *Energy and Buildings*. 2000. Vol. 31. P. 221–235.

57. Middel A. Urban microclimate monitoring using sensor networks // *Urban Climate*. 2014. Vol. 10. P. 196–210.
58. Weng Q. Thermal infrared remote sensing for urban climate studies // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2009. Vol. 64. P. 335–344.
59. Voogt J. A., Oke T. R. Thermal remote sensing of urban climates // *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 86. P. 370–384.
60. Norton B. A. et al. Planning for cooler cities: a framework to prioritise green infrastructure // *Landscape and Urban Planning*. 2015. Vol. 134. P. 127–138.
61. Richardson D. M., Pyšek P. Plant invasions and global change // *Nature Reviews Microbiology*. 2021. Vol. 19. P. 715–731.
62. Rahman M. A., Moser-Reischl A., Pauleit S. Tree traits and urban climate regulation: recent advances // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2022. Vol. 67.
63. Li H. et al. Cooling efficacy of trees across cities is determined by climate, morphology and urban context // *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5.
64. Alonzo M., McPherson E. G. Urban trees and cooling: a review of recent literature (2018–2024) // *Arboriculture & Urban Forestry*. 2025.
65. Al-Hajri S. et al. Microclimate performance analysis of urban vegetation // *Plants*. 2025. Vol. 14(4).
66. Abdelmejeed A. Y. Optimizing urban tree strategies to improve microclimate // *Discover Cities*. 2024.
67. Ruiz-Valero Á. et al. Urban tree cooling capacity varies across scales // *Frontiers in Forests and Global Change*. 2025.
68. Fu H. et al. Dynamic impacts of vegetation growth on urban microclimate // *Sustainable Cities and Society*. 2025.
69. Strepetova H. V. Microclimatic influence of introduced tree species in urban environments. 2025.
70. Ivanko I. A. Microclimatic effects of introduced tree plantings in urban areas. 2024.
71. Іщенко О. С. Дніпро // *Енциклопедія сучасної України*. Київ, 2008.
72. Дніпропетровська область // *Енциклопедія сучасної України*. Київ, 2008.

73. Агрокліматичний довідник по Дніпропетровській області (1986–2005 pp.) / за ред. О. Т. Прохоренка, Т. І. Адаменко. Дніпропетровськ: Поліграф-Медіа, 2011. 231 с.
74. Іванько І. А. та ін. Сучасне різноманіття та динаміка дендрофлори мегаполісу субаридної зони (м. Дніпро): монографія. Дніпро: ЛІРА, 2024. 196 с.
75. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources. Vienna, 2022. 234 p.
76. Plants of the World Online. Royal Botanic Gardens, Kew. 2026.
77. Weatherley P. E. Studies in the water relations of the cotton plant // *New Phytologist*. 1950. Vol. 49. P. 81–97.
78. Barrs H. D., Weatherley P. E. A re-examination of the relative turgidity technique // *Australian Journal of Biological Sciences*. 1962. Vol. 15. P. 413–428.
79. Bates D. et al. Fitting linear mixed-effects models using lme4 // *Journal of Statistical Software*. 2015. Vol. 67.
80. Fox J., Weisberg S. *An R companion to applied regression*. Thousand Oaks, 2019. 608 p.
81. Lenth R. V. emmeans: estimated marginal means. R package. 2026.
82. R Core Team. *R: a language and environment for statistical computing*. Vienna, 2025.
83. Oksanen J. et al. *vegan: community ecology package*. R package. 2026.
84. Kolde R. *pheatmap: pretty heatmaps*. R package. 2025.
85. Maechler M. et al. *expm: matrix exponential*. R package. 2024.
86. Sattler P., Jedhoff S. *CovCorTest package*. arXiv. 2025.
87. Legendre P., Legendre L. *Numerical ecology*. Amsterdam: Elsevier, 2012. 990 p.
88. Peres-Neto P. R. et al. Variation partitioning of species data matrices // *Ecology*. 2006. Vol. 87. P. 2614–2625.
89. Legendre P., Anderson M. J. Distance-based redundancy analysis // *Ecological Monographs*. 1999. Vol. 69. P. 1–24.
90. Стрепетова Х. В. та ін. Мікрокліматичний вплив інтродукованих видів дерев // *Регуляторні механізми в біосистемах*. 2025.

91. Oke T. R. Boundary layer climates. Routledge, 2002.
92. Chen L., Ng E. Quantitative urban climate mapping // Building and Environment. 2012.
93. Rahman M. A. et al. Tree canopy and urban microclimate // Agricultural and Forest Meteorology. 2015.
94. Livesley S. J. et al. Urban forest ecosystem services // Urban Forestry & Urban Greening. 2016.
95. Grimmond S. Urbanization and global environmental change // Global Environmental Change. 2007.
96. IPCC. Climate change 2021. Cambridge University Press, 2021.
97. Niinemets Ü. Canopy structure and function // Plant Biology. 2010.
98. Poorter L. et al. Leaf traits and light capture // Ecology Letters. 2009.
99. Valladares F., Niinemets Ü. Shade tolerance // Annual Review of Ecology. 2008.
100. Baldocchi D. Microclimate within plant canopies // Agricultural and Forest Meteorology. 1997.
101. Hardwick S. R. et al. Tree canopy structure and microclimate // Forest Ecology and Management. 2015.
102. Monteith J. L., Unsworth M. H. Principles of environmental physics. Academic Press, 2013.
103. Campbell G. S., Norman J. M. Environmental biophysics. Springer, 1998.
104. Pretzsch H. Forest dynamics and canopy structure. Springer, 2009.
105. Jucker T. et al. Canopy structure and ecosystem functioning // Nature Ecology & Evolution. 2018.
106. Whittaker R. H. Gradient analysis of vegetation // Biological Reviews. 1967.
107. Austin M. P. Vegetation gradients // Journal of Vegetation Science. 1985.
108. Nowak D. J. Urban forest structure and ecosystem services // Environmental Pollution. 2010.
109. Roy S. et al. Role of urban trees in climate regulation // Urban Forestry & Urban Greening. 2012.
110. Oke T. R. Urban climate theory and applications. Cambridge, 2017.

111. Bowler D. E. Urban cooling strategies // *Landscape and Urban Planning*. 2010.
112. Santamouris M. Urban heat mitigation techniques // *Solar Energy*. 2014.
113. Armson D., Stringer P., Ennos A. R. The effect of tree shade and grass on surface and globe temperatures in an urban area // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2012. Vol. 11, № 3. P. 245–255.
114. Asadian Y., Weiler M. A new approach in measuring rainfall interception by urban trees // *Hydrological Processes*. 2009. Vol. 23, № 3. P. 357–364.
115. Bartens J., Day S. D., Harris J. R., Dove J. E., Wynn T. M. Can urban tree roots improve infiltration through compacted subsoils? // *Journal of Environmental Quality*. 2008. Vol. 37, № 6. P. 2048–2057.
116. Berland A., Shiflett S. A., Shuster W. D., Garmestani A. S., Goddard H. C., Herrmann D. L., Hopton M. E. The role of trees in urban stormwater management // *Landscape and Urban Planning*. 2017. Vol. 162. P. 167–177.
117. Coutts A. M., White E. C., Tapper N. J., Beringer J., Livesley S. J. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments // *Theoretical and Applied Climatology*. 2016. Vol. 124. P. 55–68.
118. Didur O. O., Katsevykh V. V., Ivanko I. A., Loza I. M., Strepetova K. V., Holoborodko K. K., Lovynska V. M., Sytnyk S. A. The influence of introduced tree species on soil microbial communities in urban park soils // *Biosystems Diversity*. 2024. Vol. 32, № 4. P. 512–517.
119. Feng X., Qiu B., Li Z., Li H., Xu Y. Microclimate effects of four urban tree species // *Frontiers in Environmental Science*. 2023. Vol. 11. P. 1108002.
120. Georgi N. J., Zafiriadis K. The impact of park trees on microclimate in urban areas // *Urban Ecosystems*. 2006. Vol. 9. P. 195–209.
121. Gorb A. S., Duk N. M. *Klimat Dnipropetrovs'koi oblasti* [Climate of Dnipropetrovsk Region]. Dnipro: Dnipropetrovsk National University Press, 2006.
122. Hardin P. J., Jensen R. R. The effect of urban leaf area on summer time urban surface kinetic temperatures: a Terre Haute case study // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2007. Vol. 6. P. 63–72.

123. Hellebust S., Gillen S., Guilyas Á., Junker R. R., Tanács E., Hof A. Identifying tree traits for cooling urban heat islands: a cross-city empirical analysis // *Forests*. 2020. Vol. 11, № 10. P. 1064.
124. Kokila A., Nagaraja S., Hanumanthappa K., Madhaveeramurthy M. Effect of tree canopy cover on soil moisture dynamics in agroforestry systems under semi-arid conditions // *International Journal of Environment and Climate Change*. 2024. Vol. 14, № 9. P. 485–495.
125. Konarska J., Uddling J., Holmer B., Lutz M., Lindberg F., Pleijel H., Thorsson S. Transpiration of urban trees and cooling effect // *International Journal of Biometeorology*. 2016. Vol. 60, № 1. P. 159–172.
126. Kunakh O. M., Ivanko I. A., Holoborodko K. K., Lisovets O. I., Volkova A. M., Nikolaieva V. V., Zhukov O. V. Modeling spatial variation of urban park ecological properties using remote sensing data // *Biosystems Diversity*. 2022. Vol. 30, № 3. P. 213–225.
127. Li H., Zhao Y., Wang C., Ürge-Vorsatz D., Carmeliet J., Bardhan R. Cooling efficacy of trees across cities is determined by background climate, urban morphology, and tree traits // *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5.
128. Livesley S. J., McPherson E. G., Calfapietra C. The urban forest and ecosystem services: impacts on urban water, heat, and pollution cycles // *Journal of Environmental Quality*. 2016. Vol. 45, № 1. P. 119–124.
129. Lykholat Y. V., Davydov V. R., Khromykh N. O., Didur O. O. Specific features of the water regime of the genus *Chaenomeles* introduced plants in the steppe zone conditions // *Ecology and Noospherology*. 2022. Vol. 33, № 1. P. 9–14.
130. Marínsek A., Bindewald A., Kraxner F., La Porta N., Meisel P., Stojnić S., Coccozza C., Lapin K. (Eds.). Management of nonnative tree species in urban areas of the Alpine space. BFW, 2022.
131. Pataki D. E., McCarthy H. R., Litvak E., Pincetl S. Transpiration of urban forests in Los Angeles // *Ecological Applications*. 2011. Vol. 21, № 3. P. 661–677.
132. Pepe M., Crescente M. F., Varone L. Effect of water stress on physiological and morphological traits of invasive species // *Plants*. 2022. Vol. 11, № 7.

133. Ponte S., Sonti N. F., Phillips T. H., Pavao-Zuckerman M. A. Transpiration rates of red maple (*Acer rubrum*) // *Scientific Reports*. 2021. Vol. 11.
134. Rahman M. A., Armson D., Ennos A. R. A comparison of the growth and cooling effectiveness of urban tree species // *Urban Ecosystems*. 2015. Vol. 18. P. 371–389.
135. Rahman M. A. et al. Tree cooling effects under contrasting species and sites // *Agricultural and Forest Meteorology*. 2020. Vol. 287.
136. Rahman M. A. et al. Within canopy temperature differences and cooling ability of *Tilia cordata* // *Building and Environment*. 2017. Vol. 114. P. 118–128.
137. Rahman M. A. et al. Traits of trees for cooling urban heat islands: a meta-analysis // *Building and Environment*. 2020. Vol. 170.
138. Richter R. et al. Tree species matter for forest microclimate regulation during drought year 2018 // *Scientific Reports*. 2022. Vol. 12.
139. Schlaepfer M. A. et al. Quantifying contributions of native and non-native trees // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2020. Vol. 56.
140. Shupranova L. et al. Assessment of *Robinia pseudoacacia* biochemical parameters in industrial city conditions // *Екологія (Bratislava)*. 2022. Vol. 41, № 4. P. 340–350.
141. Souch C. A., Souch C. The effect of trees on microclimate // *Journal of Arboriculture*. 1993. Vol. 19. P. 303–312.
142. Toscano S., Ferrante A., Romano D. Response of Mediterranean ornamental plants to drought stress // *Horticulturae*. 2019. Vol. 5, № 1.
143. Xiao Q., McPherson E. G. Rainfall interception by urban forest // *Urban Ecosystems*. 2002. Vol. 6. P. 291–302.
144. Zhang B., Brookhouse M. Microclimatic benefits of urban shading trees // *Building and Environment*. 2025. Vol. 285.
145. Zölch T., Maderspacher J., Wamsler C., Pauleit S. Using green infrastructure for urban climate-proofing // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2016. Vol. 20. P. 305–316.

ДОДАТКИ

Таблиця 5.1 - Описова статистика варіабельності температури повітря (°C) у різних видів дерев та в різні періоди доби протягом трьох дат відбору проб (N = 8; значення наведені як середнє $\pm$ стандартне відхилення, SD). Надрядкові літери позначають статистично значущі відмінності між видами в межах кожної комбінації «дата $\times$ час доби» за результатами post-hoc тесту Тьюкі ($\alpha = 0,05$); види, що мають принаймні одну спільну літеру, статистично достовірно не відрізняються.

Вид дерев	06.08.23			13.06.23			26.07.23		
	ранок	полудень	вечір	ранок	полудень	вечір	ранок	полудень	вечір
<i>Acer negundo</i> L.	29.6 $\pm$ 2.9 ^a	40.0 $\pm$ 7.7 ^a	32.3 $\pm$ 5.3 ^a	20.4 $\pm$ 2.2 ^{ab}	28.0 $\pm$ 3.2 ^{abc}	24.6 $\pm$ 3.2 ^{abc}	27.3 $\pm$ 2.3 ^{ab}	30.2 $\pm$ 3.0 ^a	33.2 $\pm$ 4.0 ^a
<i>Acer saccharum</i> Marshall	25.3 $\pm$ 2.7 ^{ab}	38.2 $\pm$ 5.8 ^a	34.5 $\pm$ 3.9 ^a	20.5 $\pm$ 2.6 ^{ab}	25.1 $\pm$ 2.7 ^{abc}	23.4 $\pm$ 3.8 ^c	27.7 $\pm$ 3.9 ^{ab}	30.8 $\pm$ 4.2 ^a	27.5 $\pm$ 3.6 ^b
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	25.3 $\pm$ 2.3 ^{ab}	39.6 $\pm$ 5.2 ^a	32.5 $\pm$ 5.2 ^a	20.8 $\pm$ 1.6 ^{ab}	26.4 $\pm$ 3.2 ^{abc}	25.4 $\pm$ 2.7 ^{abc}	23.0 $\pm$ 2.6 ^b	29.8 $\pm$ 4.0 ^a	28.2 $\pm$ 4.8 ^{ab}
<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	25.4 $\pm$ 2.7 ^{ab}	38.4 $\pm$ 4.9 ^a	33.5 $\pm$ 2.7 ^a	21.0 $\pm$ 1.5 ^{ab}	23.0 $\pm$ 3.3 ^c	27.0 $\pm$ 4.2 ^{abc}	26.3 $\pm$ 3.2 ^{ab}	34.0 $\pm$ 4.5 ^a	31.2 $\pm$ 3.1 ^{ab}
<i>Celtis occidentalis</i> L.	25.8 $\pm$ 2.3 ^{ab}	34.2 $\pm$ 3.6 ^a	34.5 $\pm$ 5.1 ^a	21.6 $\pm$ 3.0 ^{ab}	27.9 $\pm$ 5.0 ^{abc}	27.9 $\pm$ 3.0 ^{abc}	28.6 $\pm$ 2.7 ^a	28.9 $\pm$ 2.8 ^a	31.8 $\pm$ 2.4 ^{ab}
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marshall	23.4 $\pm$ 2.6 ^b	40.6 $\pm$ 6.6 ^a	35.4 $\pm$ 2.7 ^a	20.5 $\pm$ 3.3 ^{ab}	30.3 $\pm$ 3.0 ^a	26.4 $\pm$ 4.0 ^{abc}	25.2 $\pm$ 2.4 ^{ab}	34.3 $\pm$ 5.3 ^a	28.4 $\pm$ 1.6 ^{ab}
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	27.0 $\pm$ 3.1 ^{ab}	37.3 $\pm$ 3.5 ^a	35.1 $\pm$ 4.6 ^a	23.4 $\pm$ 1.9 ^a	25.8 $\pm$ 1.9 ^{abc}	29.0 $\pm$ 2.4 ^{ab}	25.3 $\pm$ 3.1 ^{ab}	32.9 $\pm$ 3.7 ^a	31.7 $\pm$ 2.4 ^{ab}
<i>Gymnocladus dioica</i> (L.) K.Koch	28.5 $\pm$ 3.6 ^a	33.4 $\pm$ 3.1 ^a	30.6 $\pm$ 2.5 ^a	19.0 $\pm$ 3.0 ^b	25.8 $\pm$ 2.3 ^{abc}	25.0 $\pm$ 2.5 ^{abc}	22.3 $\pm$ 3.8 ^b	36.1 $\pm$ 5.2 ^a	31.0 $\pm$ 2.4 ^{ab}
<i>Quercus rubra</i> L.	29.0 $\pm$ 3.5 ^a	38.9 $\pm$ 2.8 ^a	33.8 $\pm$ 4.5 ^a	22.3 $\pm$ 2.4 ^{ab}	29.5 $\pm$ 3.6 ^{ab}	27.3 $\pm$ 4.7 ^{abc}	27.1 $\pm$ 3.3 ^{ab}	35.2 $\pm$ 6.9 ^a	31.0 $\pm$ 3.2 ^{ab}
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	25.3 $\pm$ 2.9 ^{ab}	37.9 $\pm$ 3.3 ^a	35.8 $\pm$ 3.3 ^a	19.9 $\pm$ 3.0 ^{ab}	24.5 $\pm$ 3.2 ^{bc}	26.5 $\pm$ 3.1 ^{abc}	26.1 $\pm$ 4.1 ^{ab}	29.5 $\pm$ 4.7 ^a	29.3 $\pm$ 4.3 ^{ab}
<i>Styphnolobium japonicum</i> (L.) Schott	26.0 $\pm$ 2.8 ^{ab}	36.0 $\pm$ 4.3 ^a	35.1 $\pm$ 3.5 ^a	21.6 $\pm$ 2.8 ^{ab}	25.9 $\pm$ 1.7 ^{abc}	29.9 $\pm$ 2.3 ^a	26.8 $\pm$ 3.7 ^{ab}	30.1 $\pm$ 4.2 ^a	31.8 $\pm$ 4.3 ^{ab}
<i>Ulmus pumila</i> L.	26.1 $\pm$ 2.9 ^{ab}	41.5 $\pm$ 5.7 ^a	33.0 $\pm$ 4.8 ^a	21.3 $\pm$ 2.9 ^{ab}	24.1 $\pm$ 3.5 ^c	23.8 $\pm$ 1.3 ^{bc}	26.8 $\pm$ 2.3 ^{ab}	30.4 $\pm$ 5.4 ^a	32.5 $\pm$ 2.1 ^{ab}

Таблиця 5.2 - Описова статистика відносної вологості повітря (%) у різних видів дерев та в різні періоди доби протягом трьох дат дослідження (N = 8; значення наведені як середнє $\pm$ стандартне відхилення). Надрядкові літери позначають статистично значущі відмінності між видами в межах кожної комбінації «Дата $\times$ Період доби» за результатами post-hoc тесту Tukey HSD ($\alpha = 0,05$); види, що мають принаймні одну спільну літеру, не відрізняються статистично значуще.

Вид дерев	06.08.23			13.06.23			26.07.23		
	ранок	полудень	вечір	ранок	полудень	вечір	ранок	полудень	вечір
<i>Acer negundo</i> L.	53.5 $\pm$ 7.4 ^{ab}	36.4 $\pm$ 3.1 ^{abc}	35.6 $\pm$ 4.3 ^a	70.3 $\pm$ 4.8 ^{ab}	54.5 $\pm$ 5.9 ^a	56.4 $\pm$ 7.9 ^{abc}	55.7 $\pm$ 4.3 ^a	38.2 $\pm$ 3.7 ^{bc}	42.5 $\pm$ 5.1 ^a
<i>Acer saccharum</i> Marshall	49.0 $\pm$ 6.7 ^{ab}	35.3 $\pm$ 6.1 ^{bc}	34.9 $\pm$ 5.8 ^a	63.2 $\pm$ 7.6 ^b	50.3 $\pm$ 8.3 ^a	46.3 $\pm$ 6.3 ^c	58.9 $\pm$ 9.3 ^a	42.9 $\pm$ 2.4 ^{ab}	47.4 $\pm$ 6.0 ^a
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	49.6 $\pm$ 3.7 ^{ab}	35.8 $\pm$ 5.2 ^{abc}	35.4 $\pm$ 3.7 ^a	72.1 $\pm$ 5.7 ^{ab}	54.2 $\pm$ 7.5 ^a	54.4 $\pm$ 8.1 ^{abc}	60.1 $\pm$ 6.6 ^a	47.7 $\pm$ 5.5 ^a	42.0 $\pm$ 3.9 ^a
<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	54.6 $\pm$ 7.3 ^{ab}	35.5 $\pm$ 3.8 ^{bc}	39.1 $\pm$ 3.2 ^a	71.9 $\pm$ 11.1 ^{ab}	52.8 $\pm$ 6.8 ^a	57.3 $\pm$ 6.0 ^{ab}	57.9 $\pm$ 7.1 ^a	41.7 $\pm$ 4.7 ^{abc}	40.0 $\pm$ 3.9 ^a
<i>Celtis occidentalis</i> L.	54.3 $\pm$ 9.2 ^{ab}	33.1 $\pm$ 6.2 ^{bc}	33.9 $\pm$ 5.0 ^a	78.2 $\pm$ 12.0 ^a	53.8 $\pm$ 6.6 ^a	56.8 $\pm$ 5.9 ^{abc}	58.3 $\pm$ 6.1 ^a	41.4 $\pm$ 6.1 ^{abc}	46.0 $\pm$ 5.3 ^a
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marshall	54.2 $\pm$ 8.9 ^{ab}	32.0 $\pm$ 4.9 ^c	40.2 $\pm$ 3.9 ^a	71.0 $\pm$ 6.5 ^{ab}	53.2 $\pm$ 10.6 ^a	61.3 $\pm$ 7.2 ^a	55.6 $\pm$ 7.1 ^a	43.8 $\pm$ 7.9 ^{ab}	39.1 $\pm$ 5.6 ^a
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	59.0 $\pm$ 9.3 ^a	29.8 $\pm$ 2.5 ^c	34.4 $\pm$ 5.5 ^a	66.7 $\pm$ 5.0 ^{ab}	55.0 $\pm$ 2.6 ^a	56.0 $\pm$ 7.0 ^{abc}	54.9 $\pm$ 7.8 ^a	38.7 $\pm$ 4.4 ^{bc}	41.0 $\pm$ 6.7 ^a
<i>Gymnocladus dioica</i> (L.) K.Koch	45.5 $\pm$ 5.5 ^b	42.9 $\pm$ 4.5 ^a	37.9 $\pm$ 7.2 ^a	71.2 $\pm$ 6.8 ^{ab}	50.2 $\pm$ 7.4 ^a	54.9 $\pm$ 5.5 ^{abc}	64.7 $\pm$ 7.1 ^a	41.3 $\pm$ 5.5 ^{abc}	39.0 $\pm$ 3.8 ^a
<i>Quercus rubra</i> L.	50.5 $\pm$ 5.1 ^{ab}	39.3 $\pm$ 3.0 ^{ab}	40.3 $\pm$ 4.8 ^a	64.1 $\pm$ 9.5 ^{ab}	49.5 $\pm$ 5.6 ^a	49.7 $\pm$ 7.3 ^{bc}	63.8 $\pm$ 6.7 ^a	37.9 $\pm$ 2.8 ^{bc}	40.6 $\pm$ 6.4 ^a
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	52.9 $\pm$ 5.4 ^{ab}	32.2 $\pm$ 3.7 ^{bc}	38.1 $\pm$ 4.4 ^a	61.9 $\pm$ 7.8 ^b	51.9 $\pm$ 6.1 ^a	53.8 $\pm$ 5.0 ^{abc}	60.0 $\pm$ 6.6 ^a	34.5 $\pm$ 4.0 ^c	38.6 $\pm$ 3.6 ^a
<i>Styphnolobium japonicum</i> (L.) Schott	55.0 $\pm$ 8.4 ^{ab}	32.4 $\pm$ 3.2 ^{bc}	38.5 $\pm$ 5.2 ^a	70.6 $\pm$ 14.4 ^{ab}	55.2 $\pm$ 4.9 ^a	51.9 $\pm$ 4.2 ^{abc}	54.9 $\pm$ 7.7 ^a	45.6 $\pm$ 3.5 ^{ab}	45.0 $\pm$ 6.8 ^a
<i>Ulmus pumila</i> L.	53.3 $\pm$ 5.0 ^{ab}	31.2 $\pm$ 3.7 ^c	37.5 $\pm$ 5.7 ^a	66.0 $\pm$ 6.1 ^{ab}	51.5 $\pm$ 4.5 ^a	53.8 $\pm$ 5.3 ^{abc}	66.0 $\pm$ 6.9 ^a	44.2 $\pm$ 5.9 ^{ab}	42.8 $\pm$ 6.5 ^a

Таблиця 5.3 - Описова статистика мінливості температури ґрунту (°C) у різних видів дерев та в різні періоди доби протягом трьох дат відбору проб (N = 8; значення наведені як середнє ± стандартне відхилення). Надрядкові літери позначають статистично значущі відмінності між видами в межах кожної комбінації «Дата × Період доби» за результатами post-hoc тесту Tukey HSD ($\alpha = 0,05$); види, що мають принаймні одну спільну літеру, не відрізняються статистично значуще.

Вид дерев	06.08.23			13.06.23			26.07.23		
	ранок	полудень	вечір	ранок	полудень	вечір	ранок	полудень	вечір
<i>Acer negundo</i> L.	26.1±3.2 ^{ab}	28.5±2.0 ^{ab}	28.1±3.7 ^{abc}	14.6±2.2 ^b	20.0±2.8 ^b	19.7±1.8 ^a	24.2±3.7 ^{abc}	25.4±2.7 ^{bcd}	26.2±4.5 ^b
<i>Acer saccharum</i> Marshall	23.0±2.1 ^{abc}	26.7±3.0 ^b	29.8±3.1 ^{abc}	16.6±1.0 ^{ab}	19.2±3.3 ^b	20.1±2.0 ^a	21.0±1.7 ^{bcd}	24.4±3.5 ^{cd}	29.9±1.8 ^{ab}
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	24.4±3.2 ^{abc}	29.6±3.6 ^{ab}	33.3±4.8 ^a	15.4±1.6 ^{ab}	21.9±2.4 ^{ab}	21.3±1.9 ^a	25.0±1.4 ^{ab}	32.7±3.8 ^a	32.5±5.4 ^a
<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	23.4±2.2 ^{abc}	25.5±3.4 ^b	28.1±4.7 ^{abc}	17.6±3.2 ^{ab}	19.1±2.2 ^b	20.6±2.5 ^a	20.3±2.9 ^{cd}	21.7±2.4 ^d	27.3±4.5 ^{ab}
<i>Celtis occidentalis</i> L.	21.2±3.2 ^c	27.2±3.1 ^{ab}	24.5±2.8 ^c	17.0±1.7 ^{ab}	18.7±1.9 ^b	19.2±3.0 ^a	24.8±3.0 ^{ab}	28.3±3.3 ^{abc}	27.2±3.3 ^{ab}
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marshall	22.6±3.0 ^{abc}	29.0±3.0 ^{ab}	27.0±2.8 ^{bc}	17.2±2.1 ^{ab}	22.4±3.3 ^{ab}	20.2±1.7 ^a	22.3±1.5 ^{abcd}	30.7±5.0 ^{ab}	28.8±2.6 ^{ab}
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	22.7±2.9 ^{abc}	30.6±3.0 ^{ab}	31.5±4.6 ^{ab}	15.2±2.5 ^{ab}	20.2±3.3 ^b	20.0±1.3 ^a	23.4±3.3 ^{abcd}	28.1±4.5 ^{abc}	28.1±2.7 ^{ab}
<i>Gymnocladus dioica</i> (L.) K.Koch	23.7±2.5 ^{abc}	31.0±3.2 ^{ab}	27.8±2.5 ^{abc}	16.6±2.1 ^{ab}	24.8±3.5 ^a	19.0±2.8 ^a	22.3±2.6 ^{abcd}	25.2±3.2 ^{bcd}	26.1±2.8 ^b
<i>Quercus rubra</i> L.	22.4±1.9 ^{abc}	27.0±4.3 ^{ab}	30.6±2.1 ^{ab}	15.4±2.4 ^{ab}	18.5±2.1 ^b	18.4±2.2 ^a	24.1±1.4 ^{abc}	30.2±3.7 ^{abc}	25.6±3.4 ^b
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	22.7±2.1 ^{abc}	26.7±2.4 ^b	27.6±3.6 ^{abc}	16.8±2.3 ^{ab}	21.6±1.5 ^{ab}	20.0±2.3 ^a	19.4±1.8 ^d	25.8±3.0 ^{bcd}	27.9±3.1 ^{ab}
<i>Styphnolobium japonicum</i> (L.) Schott	26.5±2.1 ^a	32.5±4.1 ^a	27.0±2.7 ^{bc}	18.7±2.4 ^a	20.7±1.3 ^{ab}	20.8±2.4 ^a	26.3±2.4 ^a	28.1±5.2 ^{abc}	30.0±2.5 ^{ab}
<i>Ulmus pumila</i> L.	22.0±1.4 ^{bc}	27.2±3.1 ^{ab}	30.9±2.9 ^{ab}	16.1±2.3 ^{ab}	20.3±2.1 ^b	19.0±1.7 ^a	26.4±2.3 ^a	24.3±3.4 ^{cd}	28.1±4.3 ^{ab}

Таблиця 5.4 - Описова статистика мінливості вологості ґрунту (%) у різних видів дерев та в різні періоди доби протягом трьох дат відбору проб (N = 8; значення наведені як середнє $\pm$ стандартне відхилення). Надрядкові літери позначають статистично значущі відмінності між видами в межах кожної комбінації «Дата $\times$ Період доби» за результатами post-hoc тесту Tukey HSD ($\alpha = 0,05$); види, що мають принаймні одну спільну літеру, не відрізняються статистично значуще.

Вид дерев	06.08.23			13.06.23			26.07.23		
	ранок	полудень	вечір	ранок	полудень	вечір	ранок	полудень	вечір
<i>Acer negundo</i> L.	9.6 $\pm$ 1.7 ^{bcd}	8.6 $\pm$ 0.9 ^{de}	4.5 $\pm$ 0.6 ^{cd}	10.9 $\pm$ 1.2 ^{efg}	11.4 $\pm$ 1.4 ^{cd}	18.9 $\pm$ 2.4 ^b	4.3 $\pm$ 0.8 ^{de}	3.9 $\pm$ 0.5 ^{bc}	5.0 $\pm$ 0.6 ^{ef}
<i>Acer saccharum</i> Marshall	9.3 $\pm$ 1.3 ^{bcd}	8.4 $\pm$ 1.0 ^{de}	3.4 $\pm$ 0.3 ^e	14.1 $\pm$ 1.0 ^{abc}	8.9 $\pm$ 0.7 ^d	13.9 $\pm$ 1.3 ^e	3.6 $\pm$ 0.4 ^{ef}	4.4 $\pm$ 0.7 ^b	5.8 $\pm$ 0.7 ^{def}
<i>Aesculus hippocastanum</i> L.	13.5 $\pm$ 1.3 ^a	12.1 $\pm$ 1.1 ^b	5.0 $\pm$ 0.4 ^c	8.9 $\pm$ 1.2 ^g	10.6 $\pm$ 1.1 ^{cd}	13.7 $\pm$ 1.7 ^e	3.9 $\pm$ 0.4 ^{def}	4.2 $\pm$ 0.2 ^{bc}	9.0 $\pm$ 0.9 ^a
<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	8.4 $\pm$ 1.2 ^d	6.0 $\pm$ 1.0 ^f	4.6 $\pm$ 0.4 ^{cd}	14.6 $\pm$ 2.6 ^{ab}	22.1 $\pm$ 2.2 ^a	24.1 $\pm$ 2.5 ^a	8.9 $\pm$ 0.5 ^a	4.3 $\pm$ 0.5 ^b	7.4 $\pm$ 0.8 ^{abc}
<i>Celtis occidentalis</i> L.	8.7 $\pm$ 0.8 ^{cd}	9.3 $\pm$ 0.8 ^d	3.4 $\pm$ 0.5 ^e	11.8 $\pm$ 1.3 ^{cdef}	17.2 $\pm$ 1.0 ^b	9.2 $\pm$ 1.0 ^f	5.5 $\pm$ 0.7 ^{bc}	3.8 $\pm$ 0.5 ^{bc}	4.7 $\pm$ 0.5 ^{ef}
<i>Fraxinus pennsylvanica</i> Marshall	7.6 $\pm$ 1.0 ^d	7.5 $\pm$ 0.9 ^{def}	5.1 $\pm$ 0.6 ^c	11.1 $\pm$ 1.3 ^{defg}	22.1 $\pm$ 2.4 ^a	15.8 $\pm$ 1.9 ^{cde}	3.4 $\pm$ 0.5 ^{ef}	2.9 $\pm$ 0.4 ^d	6.9 $\pm$ 1.2 ^{bcd}
<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	7.8 $\pm$ 0.5 ^d	6.6 $\pm$ 0.5 ^{ef}	3.6 $\pm$ 0.4 ^{de}	10.2 $\pm$ 1.1 ^{efg}	12.5 $\pm$ 1.0 ^c	9.2 $\pm$ 1.1 ^f	3.1 $\pm$ 0.3 ^f	3.5 $\pm$ 0.3 ^{cd}	6.0 $\pm$ 1.0 ^{cde}
<i>Gymnocladus dioica</i> (L.) K.Koch	8.3 $\pm$ 0.8 ^d	7.8 $\pm$ 0.8 ^{def}	4.9 $\pm$ 0.4 ^c	15.4 $\pm$ 2.2 ^a	12.3 $\pm$ 1.7 ^c	16.3 $\pm$ 1.2 ^{bcde}	4.7 $\pm$ 0.3 ^{cd}	2.9 $\pm$ 0.4 ^d	4.4 $\pm$ 0.5 ^f
<i>Quercus rubra</i> L.	11.1 $\pm$ 1.3 ^b	11.3 $\pm$ 1.3 ^{bc}	6.3 $\pm$ 1.2 ^b	13.6 $\pm$ 1.6 ^{abcd}	5.6 $\pm$ 0.7 ^e	16.9 $\pm$ 2.3 ^{bcd}	3.5 $\pm$ 0.3 ^{ef}	5.8 $\pm$ 0.6 ^a	6.1 $\pm$ 0.9 ^{cde}
<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	11.3 $\pm$ 1.5 ^b	9.3 $\pm$ 0.9 ^{cd}	8.4 $\pm$ 1.1 ^a	11.3 $\pm$ 1.0 ^{defg}	15.8 $\pm$ 2.3 ^b	14.8 $\pm$ 2.0 ^{de}	3.8 $\pm$ 0.4 ^{ef}	3.0 $\pm$ 0.5 ^d	8.5 $\pm$ 1.4 ^{ab}
<i>Styphnolobium japonicum</i> (L.) Schott	10.5 $\pm$ 1.4 ^{bc}	9.2 $\pm$ 0.8 ^d	2.2 $\pm$ 0.2 ^f	9.3 $\pm$ 1.3 ^{fg}	16.1 $\pm$ 2.2 ^b	17.8 $\pm$ 1.5 ^{bc}	4.3 $\pm$ 0.5 ^{de}	2.0 $\pm$ 0.3 ^e	7.9 $\pm$ 1.1 ^{ab}
<i>Ulmus pumila</i> L.	15.3 $\pm$ 1.9 ^a	15.1 $\pm$ 2.9 ^a	5.4 $\pm$ 0.6 ^{bc}	12.7 $\pm$ 1.6 ^{bcde}	11.8 $\pm$ 1.0 ^c	14.3 $\pm$ 1.4 ^{de}	6.1 $\pm$ 0.9 ^b	6.5 $\pm$ 0.6 ^a	8.2 $\pm$ 1.1 ^{ab}

