

ECOLOGY AND NOOSPHEROLOGY

ISSN 1726-1112 (Print)
ISSN 2310-4309 (Online)
Ecol. Noospher., 37(1), 2026, 3–9
doi: 10.15421/032601

Characteristics of element accumulation by the leaves of native and introduced tree species in an urban environment

V. M. Lovynska* ORCID ID: 0000-0002-7359-9443

S. A. Sytnyk* ORCID ID: 0009-0009-7369-3227

K. K. Holoborodko** ORCID ID: 0000-0001-7857-1119

I. M. Loza* ORCID ID: 0000-0001-7876-8624

L. V. Dotsenko* ORCID ID: 0000-0002-1488-2927

*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

**Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

Article info

Received: 13.04.2026

Revised: 29.04.2026

Accepted: 04.05.2026

Published: 18.05.2026

Dnipro State Agrarian and
Economic University,
St. Serhiy Efremov, 25,
Dnipro, 49600, Ukraine.
E-mail: glub@ukr.net

Oles Honchar Dnipro National
University, Nauky Ave., 72,
Dnipro, 49010, Ukraine.

Lovynska, V. M., Sytnyk, S. A., Holoborodko, K. K., Loza, I. M., Dotsenko, L. V. (2026). Characteristics of element accumulation by the leaves of native and introduced tree species in an urban environment. Ecology and Noospherology, 37(1), 3–9. doi:10.15421/032601

Trees in green spaces play a key role in stabilising urban environments that are subject to significant anthropogenic pressure and characterised by high levels of pollution. They also act as natural bioindicators of environmental conditions. This study aimed to assess the role of *Robinia pseudoacacia* and *Acer platanoides* in the accumulation of macroelements, microelements and heavy metals in leaf biomass under the urban conditions of Dnipro. The research was conducted in ten representative green spaces characterised by varying levels of anthropogenic pressure. Leaf samples were collected during the 2023 growing season from middle-aged trees (aged 30–50 years) exhibiting similar morphological characteristics. Element concentrations were determined using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results revealed that the content of macro- and microelements in leaves depends significantly on both species-specific traits and environmental conditions. *Robinia pseudoacacia* exhibited higher concentrations of Ca and Mg, potentially due to its greater tolerance of anthropogenic stress. In contrast, *Acer platanoides* showed elevated levels of K and Mn, along with higher spatial variability across sampling sites. The distribution of B, Co and Mo also demonstrated notable interspecific differences and site-dependent variation. Analysis of heavy metals revealed comparable Cu concentrations in both species, whereas Zn, Cd and Pb accumulated more intensely in *Acer platanoides*. The highest levels of heavy metals were recorded in Manutkovskiy Square and Druzhby Narodiv Forest Park, reflecting significant anthropogenic impact. Conversely, the lowest concentrations were observed in Prydniprovskiy Park and the 'Tunnelna' ravine, suggesting lower pollution levels. Overall, the findings highlight pronounced species-specific patterns of element accumulation. While *Acer platanoides* can be considered a sensitive bioindicator of urban environmental pollution, *Robinia pseudoacacia* demonstrates more stable accumulation patterns and relative tolerance to elevated metal concentrations. Both species are therefore promising candidates for phytomonitoring and bioindication of urban ecosystem conditions.

Keywords: *Robinia pseudoacacia*; *Acer platanoides*; macronutrients; micronutrients; heavy metals; anthropogenic pollution.



The article and any related published material are licensed under the Creative Commons Attribution License (CC BY 4.0).

Особливості акумуляції елементів листками аборигенних та інтродукованих деревних видів в умовах урбанізованого середовища

В. М. Ловинська* ORCID ID: 0000-0002-7359-9443

С. А. Ситник* ORCID ID: 0009-0009-7369-3227

К. К. Голобородько** ORCID ID: 0000-0001-7857-1119

І. М. Лоза* ORCID ID: 0000-0001-7876-8624

Л. В. Доценко* ORCID ID: 0000-0002-1488-2927

*Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна

**Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

Урбанізовані середовища, що зазнають значного техногенного навантаження, характеризуються підвищеним рівнем забруднення, у якому деревні рослини насаджень відіграють ключову роль як стабілізатори екосистем і природні біоіндикатори стану довкілля. Метою цієї роботи стало визначення ролі *Robinia pseudoacacia* та *Acer platanoides* у процесах акумуляції макро-, мікроелементів і важких металів у листовій біомасі в умовах урбанізованого середовища м. Дніпро. Дослідження проводили на десяти репрезентативних ділянках зеленої зони міста з різним рівнем антропогенного навантаження. Вибір зразків здійснювали протягом вегетаційного періоду 2023 року з дерев середнього віку (30–50 років), що характеризувалися подібними морфологічними ознаками. Концентрацію елементів визначали методом індуктивно зв'язаної плазмової мас-спектрометрії. Встановлено, що вміст макро- та мікроелементів у листках обох видів суттєво залежить як від видових особливостей, так і від умов місцезростання. Для *Robinia pseudoacacia* характерні вищі концентрації Ca та Mg, що може бути пов'язано з більшою толерантністю до техногенного навантаження. Водночас *Acer platanoides* демонструє вищі рівні накопичення K і Mn, а також значну варіабельність їхнього вмісту залежно від локації. Вміст B, Co та Mo характеризується міжвидовими відмінностями і просторовою неоднорідністю. Аналіз важких металів показав, що концентрації Cu у досліджуваних видів є зівставними, тоді як Zn, Cd і Pb значно інтенсивніше накопичуються у листках *Acer platanoides*. Максимальні значення важких металів зафіксовано у сквері Манутковського та лісопарку Дружби народів, що свідчить про високий рівень техногенного навантаження на ці території. Натомість найнижчі показники виявлено у парку «Придніпровський» та Тунельній балці. Отримані результати свідчать про виражені видоспецифічні особливості акумуляції елементів. *Acer platanoides* може розглядатися як чутливий біоіндикатор забруднення урбанізованого середовища, тоді як *Robinia pseudoacacia* характеризується більш стабільними показниками та відносною толерантністю до підвищених концентрацій металів. Отже, обидва види є перспективними об'єктами для фітоіндикаційних досліджень стану міських екосистем.

Ключові слова: *Robinia pseudoacacia*; *Acer platanoides*; макроелементи; мікроелементи; важкі метали; техногенне навантаження.

Вступ

Інтенсивність освоєння урбатехногенних територій привела до значного підвищення важливості значення зелених насаджень із виконанням їхніх екологічних функцій. Зеленої зони м. Дніпро створюють культурні насадження міста та приміські ліси штучного та природного походження.

Мінеральне живлення в умовах техногенно трансформованого середовища є фундаментальною складовою життєдіяльності рослин, оскільки визначає інтенсивність росту, продуктивність та адаптаційні можливості до умов довкілля. Для нормального функціонування рослинного організму необхідний комплекс хімічних елементів, які беруть участь у структурній організації клітин, метаболічних процесах та регуляції фізіологічних функцій. Загальновідомо, що до макроелементів належать Mg, P, S, K, Ca, які поглинаються рослинами у відносно великих кількостях і становлять основу метаболічних процесів (Hawkesford et al., 2023; Sarraf et al., 2026). Фосфор (P) входить до складу нуклеїнових кислот, фосфоліпідів та АТФ, забезпечуючи енергетичний обмін і синтез біомолекул. Калій (K) відіграє важливу роль у регуляції осмотичного потенціалу

клітин, відкриванні протоплазм і активації ферментів, що впливає на водний режим рослин. Кальцій (Ca) є структурним компонентом клітинної стінки та забезпечує стабільність мембран і процеси клітинного поділу (Wang et al., 2022). Магній (Mg) входить до складу хлорофілу та бере участь у фотосинтезі, а також у функціонуванні ферментів. Сірка (S) є складовою амінокислот і білків, а також відіграє роль у синтезі ферментів і коферментів. Макроелементи забезпечують формування структурних компонентів клітини та енергетичні процеси, що є критично важливими для росту деревних рослин (Kumar, Singh, 2021).

У свою чергу, мікроелементи (B, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Mo) необхідні у значно менших концентраціях, проте їх роль у фізіології рослин є надзвичайно важливою. Вони беруть участь у ферментативних реакціях, транспорті електронів та синтезі біологічно активних речовин (Hawkesford et al., 2023). Мікроелементи забезпечують нормальне функціонування ферментних систем і регуляцію метаболічних процесів, що особливо важливо для стійкості деревних рослин до стресових факторів.

До умовно необхідних елементів належить Al (алюміній), який не є обов'язковим для всіх рослин, проте може підвищувати їх адаптаційні можливості,

зокрема, у низьких концентраціях може стимулювати ріст окремих видів. Однак у більшості випадків Al проявляє токсичність, особливо в кислих ґрунтах (Rahman et al., 2024). Однак такі елементи, як Cr, As, Cd, Pb, належать до токсичних, які не виконують фізіологічних функцій і негативно впливають на рослини навіть у невеликих концентраціях (Mohamed et al., 2025). Вони порушують ферментативні процеси, фотосинтез і водний обмін, що призводить до пригнічення росту та розвитку рослин. Зокрема, кадмій (Cd) і свинець (Pb) здатні накопичуватися в тканинах рослин і викликати токсичні ефекти, тоді як миш'як (As) порушує енергетичний обмін через конкуренцію з фосфором (Romanchuk, Kravchuk, 2024; Sovhira et al., 2025).

Деревні рослини характеризуються високою адаптивністю до урбанізованих умов, що проявляється у здатності ефективно засвоювати як макро-, мікроелементи, так і важкі метали в умовах техногенного навантаження (Zubrovska, 2015; Buta et al., 2021). Інтродуцент робінія несправжньоакація (*Robinia pseudoacacia* L.) та аборигенний вид клен гостролистий (*Acer platanoides* L.) є найпоширенішими деревними видами міста Дніпро, однак їх здатність до акумуляції елементів мінерального живлення в умовах урбанізованих територій досі вивчена недостатньо. Зокрема, для *Robinia pseudoacacia* встановлено значний вміст основних макроелементів у листовій біомасі (Ca, K, Mg, P), що свідчить про активні процеси мінерального живлення навіть на бідних або деградованих ґрунтах. Водночас дослідження показують, що під впливом важких металів у цього виду змінюється баланс макроелементів і посилюються фізіолого-біохімічні механізми регуляції живлення, зокрема через взаємодію з мікоризними грибами, що сприяє підвищенню засвоєння фосфору та стійкості до токсичних елементів (Shahid et al., 2020; Zhang et al., 2022). Для *Acer platanoides* характерною є ефективна акумуляція мікроелементів і важких металів у листках, що пов'язано з інтенсивними процесами транспірації та осадження атмосферних аерозолів на листовій поверхні (Tomašević et al., 2020; Zhou et al., 2021).

Окремі дослідження показали, що обидва види активно включають у свій метаболізм такі елементи, як Zn, Cu, Pb і Cd, із переважанням цинку та міді у листових тканинах (Zhang et al., 2020). При цьому *Acer platanoides* часто демонструє вищу чутливість до змін елементного складу середовища, що робить його ефективним біоіндикатором, тоді як *Robinia pseudoacacia* характеризується більшою толерантністю та здатністю підтримувати стабільне мінеральне живлення в умовах забруднення (Kosiorek et al., 2022; Swiatkiewicz et al., 2023).

Метою нашої роботи стало визначення ролі робінії несправжньоакації та клену гостролистого в акумулюванні макро-, мікроелементів, а також важких металів в умовах урбанізованих територій м. Дніпро.

Матеріали та методи досліджень

Експериментальні дослідження проводилися в межах зеленої зони м. Дніпро. Вибір листової біомаси проводили на десяти локаціях: парк імені Т. Г. Шевченка, парк Лазаря Глоби, сквер

Металургів, Ботанічний сад Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, парк «Зелений гай», парк «Придніпровський», парк «Молодіжний», Тунельна балка, сквер Манутковського та лісопарк Дружби народів. Для дослідження відбирали дерева середнього віку (30–50 років), які належали до однієї вікової групи та характеризувалися подібними морфологічними ознаками. Обрані екземпляри не мали видимих ушкоджень біотичного походження, а також не піддавалися обробці хімічними препаратами. Вибір зразків дерев проводили протягом вегетаційного періоду 2023 року. Один зразок складався з 10–12 листків, взятих із дерев у кількості п'яти особин. Листки відбирали з однакової (південної) локації крони дерева.

Вміст макро-, мікроелементів, а також важких металів у листовій біомасі визначали після попередньої підготовки зразків. Відібране листя висушували у сушильній шафі при температурі 60 °C упродовж 24 годин, після чого подрібнювали до порошкоподібного стану за допомогою ультрацентрового млина (Retsch ZM 1000). Наважку масою 100 мг обробляли сумішшю 200 мкл ультрачистої води та 1,9 мл 65 % HNO_3 у центрифужних пробірках із подальшою інкубацією протягом однієї години під витяжною шафою. Далі до зразків додавали 600 мкл 4,8 % розчину HF і проводили мікрохвильове розкладання впродовж 1–2 годин (Wiche et al., 2017). Після цього об'єм розчину доводили до необхідного рівня ультрачистою водою, а перед вимірюванням здійснювали розведення у співвідношенні 1:10. Концентрацію елементів визначали методом індуктивно зв'язаної плазмової мас-спектрометрії (ICP-MS, X Series 2, Thermo Fisher Scientific, Німеччина).

Розрахунок вмісту макро-, мікроелементів та важких металів у біомасі здійснювали з урахуванням коефіцієнтів розведення та точної маси зразків. Отримані дані представлено у вигляді середнього значення та стандартного відхилення ($\bar{x} \pm \text{SD}$). Для оцінки статистичної значущості відмінностей між вибірками застосовували однофакторний дисперсійний аналіз (ANOVA) з використанням програмного забезпечення Statistica 8 (StatSoft, США). Відмінності вважали статистично значущими на рівні $p < 0,05$.

Результати та обговорення

Як показав аналіз вмісту макроелементів у листовій біомасі *Robinia pseudoacacia* та *Acer platanoides*, їх концентрації мали істотну залежність як від виду рослин, так і від умов ділянок (рис. 1).

Для робінії характерні вищі концентрації Ca та Mg, що може бути пов'язано з її більшою толерантністю до антропогенного навантаження та ефективнішою системою мінерального живлення. Зокрема, максимальні значення Ca (422400 мкг/г) у *Robinia pseudoacacia* спостерігаються у парках із підвищеним техногенним впливом (парк «Молодіжний»), що може свідчити про накопичення цього елемента як механізму регуляції йонного балансу. У той самий час у клена гостролистого концентрації кальцію є дещо

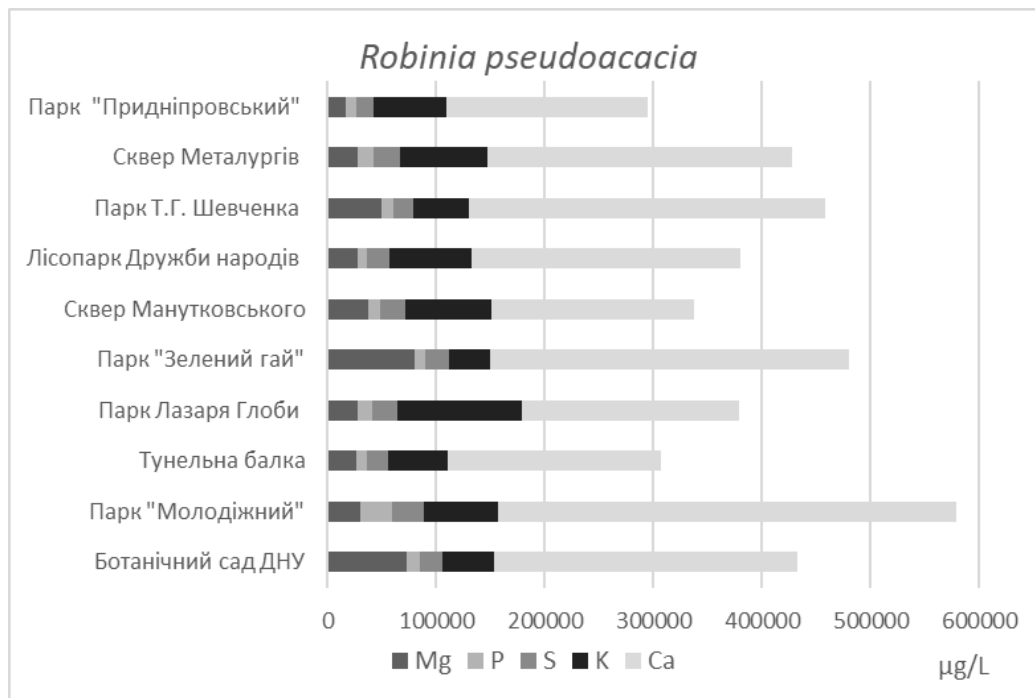


Рис. 1. Вміст макроелементів (мкг/г) у листках робінії несправжньоакації із різних місць зростання дерев

нижчими (рис. 2), але більш варіабельними залежно від локації, що вказує скоріше за все на його чутливість до змін ґрунтово-екологічних умов.

Вміст К у обох видів демонстрував значні коливання, проте у *Acer platanoides* частіше фіксуються підвищені значення, порівняно із робінією. Магній (Mg)

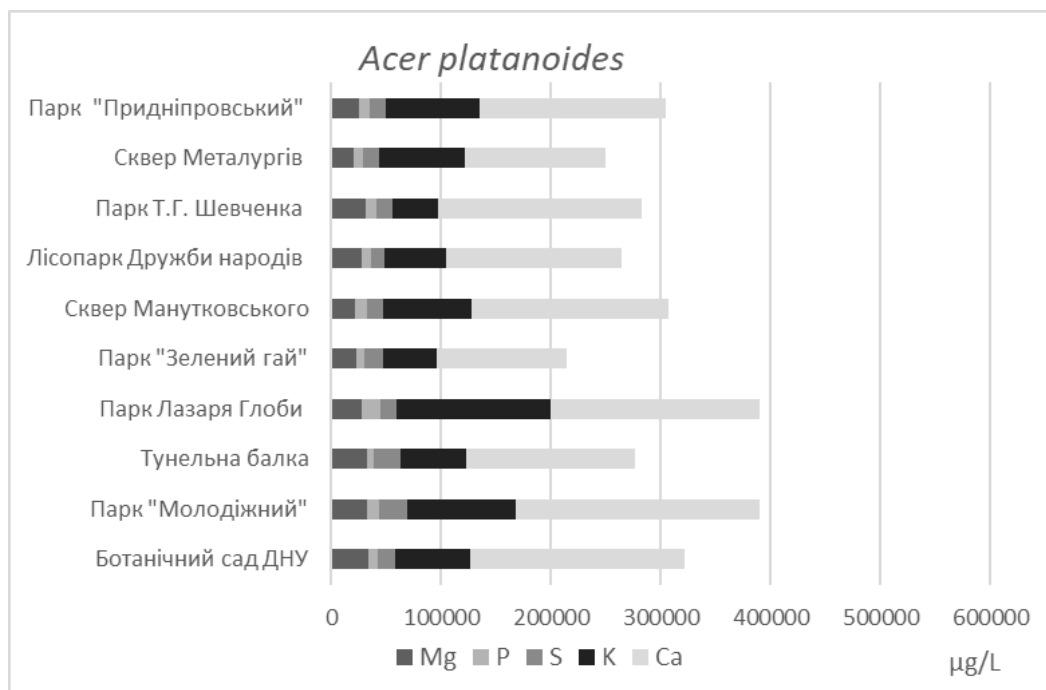


Рис. 2. Вміст макроелементів (мкг/г) у листках клена гостролистого із різних місць зростання дерев

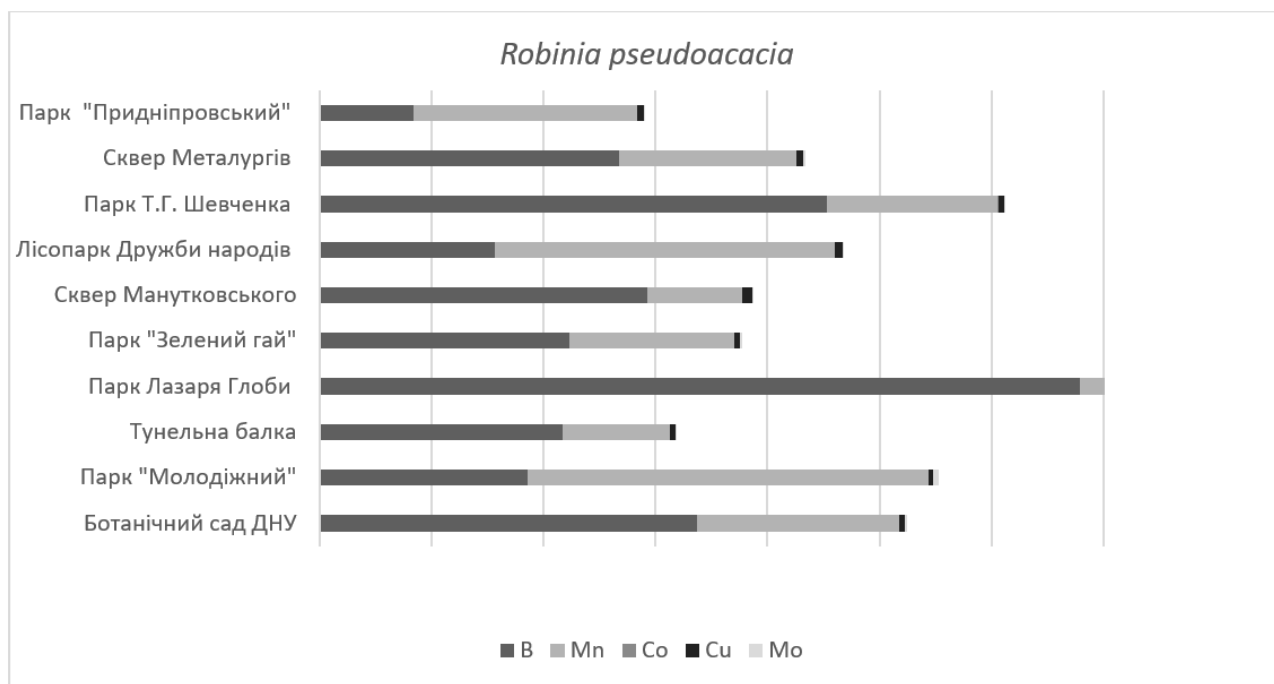
у робінії, як правило, накопичується у більших кількостях порівняно з кленом, що може бути пов'язано з активнішими фотосинтетичними процесами та адаптацією до стресових умов (Ahmed et al., 2023; Sarraf et al., 2026).

Фосфор (P) і сірка (S) демонструють відносно стабільні значення в обох видів, однак у *Robinia pseudoacacia* простежується тенденція до більш

рівномірного розподілу цих елементів між локаціями, тоді як у клена їх вміст сильніше варіює.

Аналіз вмісту мікроелементів (B, Mn, Co, Cu, Mo) у листовій біомасі *Robinia pseudoacacia* та *Acer platanoides* свідчив про наявність істотних міжвидових відмінностей (рис. 3). Встановлено також значну просторову варіабельність показників мікроелементного вмісту залежно від локації.

a



b

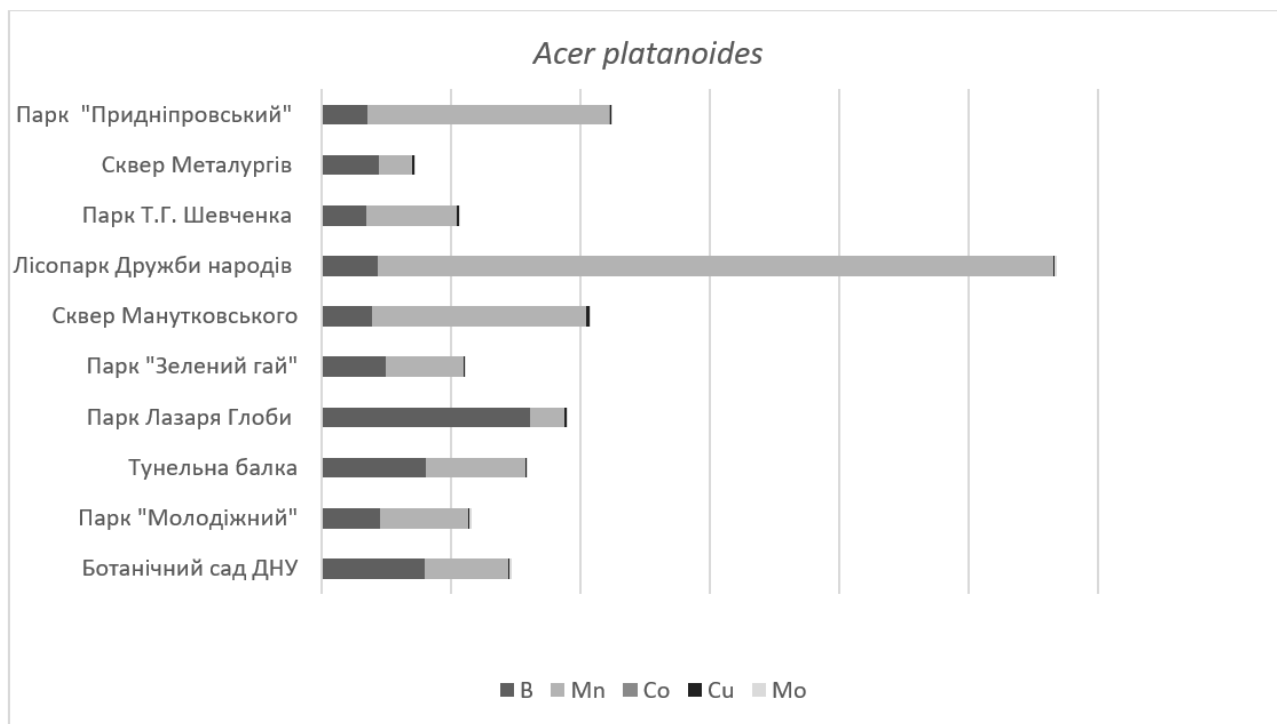


Рис. 3. Вміст мікроелементів у листках робінії несправжньоакації (*a*) та клена гостролистого (*b*) за умов різного місцезростання

Вміст Mn демонстрував суттєво вищі значення у *Acer platanoides*, порівняно із робінією, із концентрацією до 3747,0 мкг/г (парк «Придніпровський») та 3323,0 мкг/г (сквер Манутковського). У той самий час максимальні показники Mn у листках *Robinia pseudoacacia* не перевищували 1793,0 мкг/г (парк «Молодіжний»). Це може вказувати на більшу здатність клена до акумуляції Mn у листовій тканині. Водночас у робінії спостерігалася більш рівномірна динаміка розподілу цього елемента між дослідними ділянками (422,6–1793,0 мкг/г), що може свідчити про

стабільніші механізми регуляції його надходження та транспорту.

Концентрації Co в обох видів залишалися відносно низькими і коливалися у межах 0,7–2,1 мкг/г для *Robinia pseudoacacia* та 0,9–3,4 мкг/г для *Acer platanoides*, із незначним підвищенням на окремих ділянках (сквер Металургів).

Вміст Cu характеризувався помірною варіабельністю: у робінії – 21,2–41,6 мкг/г із максимумом у сквері Манутковського, тоді як у клена – 17,2–38,5 мкг/г із піком на цій самій локації.

Концентрації Мо залишалися найнижчими серед досліджуваних елементів: 0,7–24,3 мкг/г у *Robinia pseudoacacia* (максимум у парку «Молодіжний») та 2,5–11,8 мкг/г у *Acer platanoides* (максимум у лісопарку Дружби народів).

Наведені дані на рис. 4 відображають вміст важких металів (Cu, Zn, Cd, Pb) у листках досліджуваних видів. Концентрації Cu у *Robinia pseudoacacia* варіюють у межах 21,2–41,6 мкг/г, досягаючи максимальних значень у сквері Манутковського (41,6 мкг/г) та лісопарку Дружби народів (35,9 мкг/г). У *Acer platanoides* цей показник є дещо нижчим у більшості локацій (17,2–38,5 мкг/г), однак також демонструє підвищення у тих самих антропогенно навантажених зонах. Це може свідчити про подібну реакцію обох видів на локальні джерела техногенного забруднення. Вміст Zn характеризується значно ширшим діапазоном змін.

У *Robinia pseudoacacia* він коливається від 64,0 до 154,8 мкг/г, тоді як у *Acer platanoides* значення істотно вищі – від 112,5 до 383,2 мкг/г. Особливо високі концентрації Zn зафіксовані у сквері Манутковського (383,2 мкг/г) та парку ім. Лазаря Глоби (228,7 мкг/г), що вказує на інтенсивне накопичення цього елемента кленом гостролистим і, ймовірно, більшу його чутливість або акумуляційну здатність щодо цинку.

Cd в обох видів виявлено у відносно низьких концентраціях, проте з помітними локальними піками. Найвищий вміст Cd встановлено у лісопарку Дружби народів (2,5 мкг/г) та сквері Манутковського (1,3 мкг/г), що може свідчити про наявність специфічних джерел цього токсичного елемента у зазначених локаціях. Концентрації Pb також варіюють залежно від місця зростання. У *Robinia pseudoacacia* вони становлять 1,8–15,5 мкг/г із

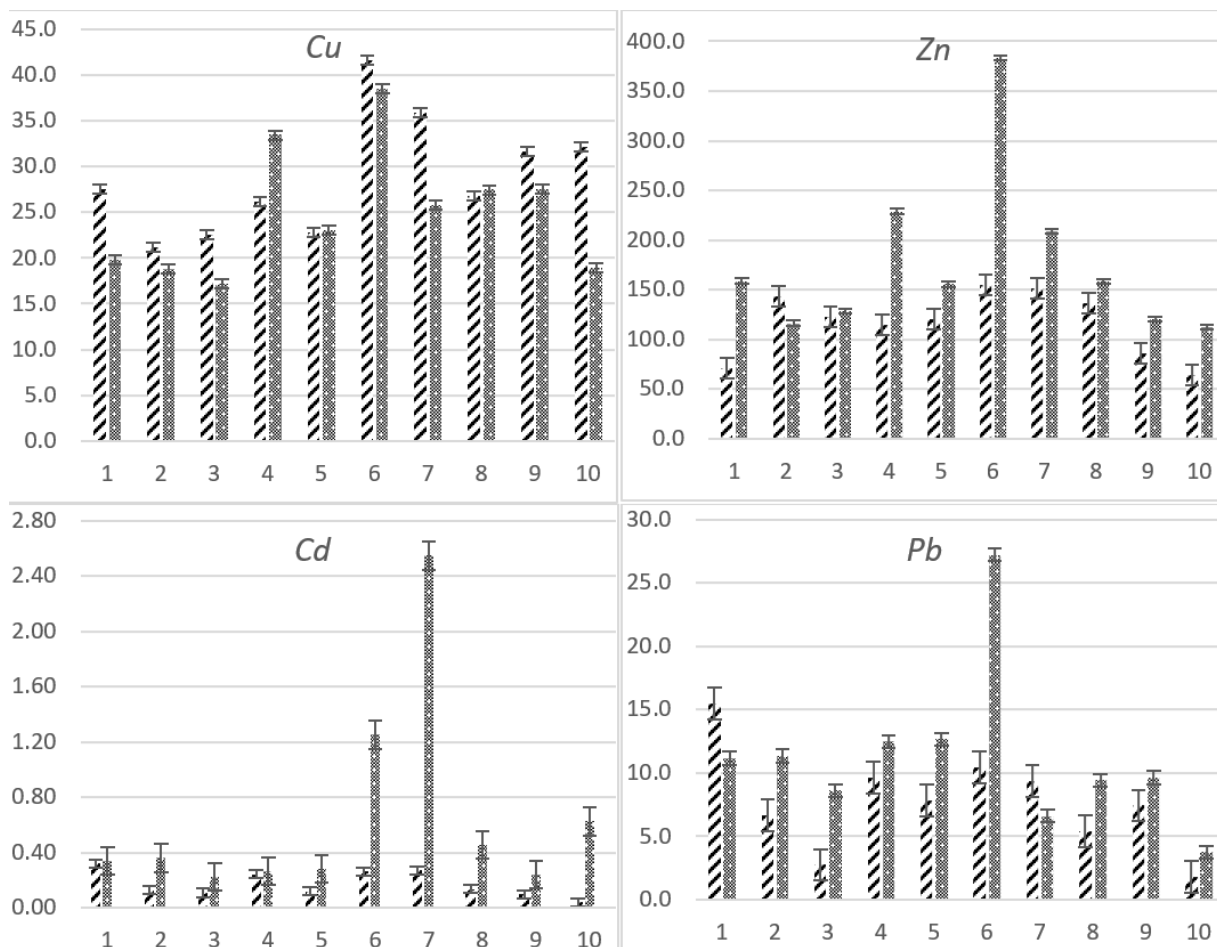


Рис. 4. Вміст важких металів у листках робінії несправжньоакації (штрих) та клена гостролистого (пункт) залежно від місцезростання рослин: 1 – Ботанічний сад ДНУ; 2 – парк «Молодіжний»; 3 – Тунельна балка; 4 – парк Лазаря Глоби; 5 – парк «Зелений гай»; 6 – сквер Манутковського; 7 – лісопарк Дружби народів; 8 – парк Т.Г. Шевченка; 9 – сквер металургів; 10 – парк «Придніпровський»

максимумом у Ботанічному саду ДНУ. У *Acer platanoides* діапазон значень вмісту свинцю складає 3,8–27,2 мкг/г, причому найбільше значення зафіксовано знову у сквері Манутковського. У просторовому аспекті найбільш забрудненими виявилися ділянки зі значним антропогенним навантаженням, зокрема сквер Манутковського та лісопарк Дружби народів, де спостерігається підвищення концентрацій одразу кількох важких металів. Натомість відносно нижчі значення

зафіксовано у парку «Придніпровський» та Тунельній балці, що може свідчити про менший вплив техногенних джерел.

Висновки

Визначено вищу здатність до накопичення макроелементів для робінії несправжньоакації для різних умов міського середовища, тоді як клен гостролистий проявляв більшу екологічну

чутливість, що відображається у значній варіабельності показників мінерального живлення залежно від місця локалізації рослин. Робінія несправжньоакація відзначається відносно стабільнішими показниками накопичення мікроелементів у різних умовах міського середовища, тоді як клен гостролистий характеризується показниками вищої варіабельності змін, особливо у випадку Mn і Cu. Робінія несправжньоакація характеризувалася вищими або зрівняними концентраціями бору, що свідчить про її ефективніші механізми засвоєння цього елемента.

Отримані результати свідчать про видоспецифічні особливості акумуляції важких металів. Зокрема, *Acer platanoides* характеризується вищою здатністю до накопичення Cd і Pb, тоді як *Robinia pseudoacacia* демонструє більш помірні рівні акумуляції. Це дозволяє розглядати клен гостролистий як більш чутливий індикатор забруднення міського середовища, тоді як робінія псевдоакація може виступати як відносно толерантний вид у фітоіндикаційних дослідженнях.

References

- Ahmed, N., Zhang, B., Bozdar, B., Chachar, S., Rai, M., Li, J., ... Tu, P. (2023). The power of magnesium: Unlocking the potential for increased yield, quality, and stress tolerance of horticultural crops. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1285512.
- Buta, E., Cantor, M., & Buta, M. (2021). The influence of urban pollution on physiological processes and mineral nutrition in woody plant species. *Plants*, 10(11), 2345.
- Hawkesford, M. J., Kopriva, S., & De Kok, L. J. (Eds.) (2014). *Nutrient Use Efficiency in Plants: Concepts and Approaches*. Springer.
- Kosiorek, M., Wyszowski, M., & Modrzewska, B. (2022). Content of trace elements in leaves of selected urban tree species depending on environmental conditions. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 35612–35624.
- Kumar, A., & Singh, S. (2021). Role of essential mineral nutrients in plant growth and stress tolerance. *Plants*, 10(12), 2763.
- Mohamed, H. I., Ullah, I., Toor, M. D., Tanveer, N. A., Din, M. U., Basit, A., Sultan, Y., Muhammad, M., & Rehman, M. U. (2025). Heavy metals toxicity in plants: Understanding mechanisms and developing coping strategies for remediation. *Bioresources and Bioprocessing*, 12(1), 95.
- Rahman, S. U., Han, J.-C., Ahmad, M., Ashraf, M. N., Khaliq, M. A., Yousaf, M., Wang, Y., Yasin, G., Nawaz, M. F., Khan, K. A., & Du, Z. (2024). Aluminum phytotoxicity in acidic environments: A comprehensive review of plant tolerance and adaptation strategies. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 269, 115791.
- Romanchuk, L. D., & Kravchuk, T. V. (2024). Kontsentratsiia vzhkykh metaliv u grunti pry vyroshchuvanni amarantu v umovakh Zhytomyrskoho Polissia [Concentrations of heavy metals in soil during amaranth cultivation in the Zhytomyr Polissya region]. *Ahrarni innovatsii*, 25, 69–75.
- Sarraf, M. S., Bansal, R., Shackira, A. M., Yadav, V., & Zorbakhsh, S. (2026). Magnesium-mediated stress adaptation in plants: From physio-biochemical insights to climate-resilient agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 17.
- Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Niazi, N. K. (2020). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 36–58.
- Sovhira, S., Kochubei, O., & Dushechkina, N. (2025). Hlobalni naslidky nakopychennia vzhkykh metaliv u prysnovodnykh ekosystemakh [The global consequences of heavy metal accumulation in freshwater ecosystems]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku*, 2, 102–110.
- Swiatkiewicz, S., Arasimowicz-Jelonek, M., & Deckert, J. (2023). Physiological responses of woody plants to heavy metal stress: Implications for urban ecosystems. *Plants*, 12(5), 1045.
- Tomašević, M., Aničić Urošević, M., Jovanović, L., & Vukmirović, Z. (2020). Airborne trace element accumulation in tree leaves as a tool for urban pollution monitoring. *Environmental Pollution*, 256, 113424.
- Wang, Y., Chen, X., & Whalley, W. R. (2022). Plant nutrient acquisition and utilization in response to environmental stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 178, 1–10.
- Wiche O., Zertani V., Hentschel W., Achtziger R., & Midula, P. (2017). Germanium and rare earth elements in topsoil and soil-grown plants in different land use types in the mining area of Freiberg (Saxony). *Journal of Geochemical Exploration*, 175, 120–129.
- Zhang, X., Chen, B., & Zhang, J. (2022). Arbuscular mycorrhizal fungi enhance plant tolerance to heavy metal stress: Mechanisms and applications. *Environmental Pollution*, 292, 118399.
- Zhang, Z., Rengel, Z., & Meney, K. (2020). Heavy metal uptake and accumulation in plants: A review focusing on phytoremediation and tolerance mechanisms. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 829.
- Zubrovskaya, O. (2015). Bioindykatsiia otsinka zabrudnennia dovkillia vzhkymy metalamy za stanom asymiliatsiinykh orhaniv derevnykh roslyn [Bioindicator assessment of heavy metal pollution in the environment based on the condition of the assimilatory organs of woody plants]. *Ecological Bulletin of Kryvyi Rih District*, 1, 42–44.
- Zhou, Y., Li, H., & Wang, L. (2021). Foliar uptake and accumulation of atmospheric heavy metals in urban trees: Mechanisms and ecological implications. *Science of the Total Environment*, 761, 143220.