

УДК 630*22/.23:633.875(292.486)(477)

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.144.42>

АКУМУЛЯЦІЯ МЕТАЛІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ (Mn, Fe, Co, Ni) У БІОМАСІ АСИМІЛЯЦІЙНОЇ ФРАКЦІЇ *ROBINIA PSEUDOACASIA* L. ТА *ACER PLATANOIDES* L. У ЗЕЛЕНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ МІСТА ДНІПРО

Ситник С.А. – д.с.-г.н., доцент,

головний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії

лісового господарства,

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

orcid.org/0000-0002-7646-6347

Лакида П.І. – д.с.-г.н., професор,

професор кафедри лісу та лісового менеджменту,

Національний університет біоресурсів і природокористування України

orcid.org/0000-0001-7857-1119

Ловинська В.М. – д.с.-г.н., доцент,

головний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії

лісового господарства,

Дніпровський державний аграрно-економічний університет

orcid.org/0000-0002-7359-9443

Голобородько К.К. – д.б.н., професор,

головний науковий співробітник науково-дослідної лабораторії

наземної екології, лісового ґрунтознавства та рекультивації земель,

Науково-дослідний інститут біології Дніпровського національного

університету імені Олеся Гончара

orcid.org/0000-0001-7857-1119

Урбоекосистеми великих міст, зокрема міста Дніпро, зазнають значного антропогенного тиску через забруднення довкілля важкими металами, що є наслідком інтенсивної діяльності промислових підприємств. Серед сучасних підходів до мінімізації впливу токсичних елементів у міському середовищі важливе місце займає біологічний метод оптимізації стану довкілля за допомогою здатності рослин поглинати й акумулювати метали. У цьому дослідженні розглянуто акумулятивну здатність двох поширених деревних видів – *Robinia pseudoacacia* L. (робінія несправжньоакація) та *Acer platanoides* L. (клен гостролистий), які формують основу зелених насаджень міста Дніпро. У межах дослідження проведено збір зразків листя з семи паркових зон міста, де проаналізовано вміст чотирьох металів – Мангану (Mn), Феруму (Fe), Кобальту (Co) та Нікелю (Ni) – методом мас-спектрометрії (ICP-MS). Отримані дані вмісту металів показали, що біомаса *A. Platanoides* характеризується вищим середнім вмістом усіх досліджуваних елементів, зокрема високими концентраціями Mn та Fe, які значно перевищують фітотоксичні пороги. У той час як *R. Pseudoacacia* демонструє переважне накопичення Fe, що становить до 73% від загального вмісту металів у біомасі, *A. Platanoides* показує більш збалансований розподіл між марганцем (47%) і Fe (50%). Результати свідчать про високу адаптивність обох видів до умов техногенного забруднення та їхню потенційну ефективність у фіторемедіаційних технологіях. Також підкреслено важливість регулярного моніторингу рівнів важких металів у біомасі зелених насаджень для забезпечення сталого функціонування міських екосистем. Отримані дані можуть бути використані при плануванні екологічно обґрунтованого озеленення міських територій, з урахуванням здатності деревних видів до акумуляції речовин з потенційною токсичною дією та досягнення екологічної рівноваги.

Ключові слова: акумуляційний потенціал дерев, паркові й рекреаційні зони, фіторемедіація, біомаса асиміляційних органів.

Sytnyk S.A., Lakyda P.I., Lovynska V.M., Holoborodko K.K. Accumulation of metallic elements (Mn, Fe, Co, Ni) in the assimilatory biomass of *Robinia pseudoacacia* L. and *Acer platanoides* L. within the green infrastructure of the Dnipro City

Urban ecosystems of large cities, including the city of Dnipro, are under significant technogenic pressure due to environmental pollution with heavy metals, primarily caused by the intensive activity of industrial enterprises. Among relevant approaches to minimizing the impact of toxic elements in urban environments, the biological method of environmental optimization using the ability of woody plants to absorb and accumulate metals plays an important role. This study examines the accumulation capacity of two common tree species – *Robinia pseudoacacia* L. (black locust) and *Acer platanoides* L. (Norway maple), which form the basis of green infrastructure in the Dnipro city. Leaf samples were collected from seven urban parks and analyzed for the content of four metals – manganese (Mn), iron (Fe), cobalt (Co), and nickel (Ni) using inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS). The results showed that the biomass of *A. platanoides* had higher average concentrations of all analyzed elements, particularly Mn and Fe, which significantly exceeded phytotoxic thresholds. While *R. pseudoacacia* predominantly accumulated Fe (up to 73% of the total metal content in its biomass), *A. platanoides* exhibited a more balanced distribution between Mn (47%) and Fe (50%). These findings indicate a high adaptive capacity of both species to conditions of technogenic pollution and their potential effectiveness in phytoremediation technologies. The study also emphasizes the importance of regular monitoring of heavy metal levels in urban green biomass to ensure the sustainable functioning of city ecosystems. The obtained data can be used for planning ecologically sound urban landscaping, taking into account the ability of tree species to accumulate substances with potential toxic effects and to contribute to ecological balance.

Key words: accumulation potential of tree species, park and recreational zones, phytoremediation, assimilatory organ biomass.

Постановка проблеми. Забруднення середовища промислових міст металами з потенційною токсичною дією залишається однією з найбільш актуальних екологічних проблем, яка негативно впливає на стан урбоєкосистем. Діяльність металургійної, машинобудівної та хімічної промисловості у місті Дніпро призводить до накопичення токсичних концентрацій металічних елементів у ґрунті, атмосфері та водних об'єктах, що зумовлює необхідність пошуку ефективних методів нівелювання токсичної дії та доведення до оптимального стану забруднених територій.

Одним із перспективних підходів у сучасній екології є використання фіторе mediaції, тобто застосування рослин для адсорбції та акумуляції речовин з потенційною токсичною дією із навколишнього середовища. Особливо важливим є визначення видів дерев, які можуть ефективно, на довгий час накопичувати металічні метали у своїй біомасі, виконуючи функції природних фільтрів у міській зеленій інфраструктурі.

Види дерев *Robinia pseudoacacia* L. (робінія несправжньоакація) та *Acer platanoides* L. (клен гостролистий) є широко розповсюдженими складовими міського ландшафту Дніпра, водночас недостатньо досліджень їх особливості адсорбції та акумуляції металічних елементів цими видами у реальних умовах середовища міста. Це обумовлює необхідність проведення комплексних досліджень, спрямованих на визначення механізмів взаємодії рослин з поллютантами, що дозволить розробити ефективні стратегії використання цих видів задля нівелювання забруднення важкими металами ґрунтів паркових зон міста.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність досліджень, присвячених використанню деревних рослин для адсорбції важких металів у забруднених урбанізованих середовищах, зростає у зв'язку зі зростаючими екологічними загрозами. Дослідження здатності видів дерев до поглинання і накопичення важких металів показує, що різні види рослин мають суттєві відмінності у цій характеристиці, що визначає їх потенціал для застосування у фіторе mediaції [1, с. 204–208].

Проаналізовано особливості поглинання важких металів *Robinia pseudoacacia* L., *Acer platanoides* L., *Ulmus minor* Mill., *Populus nigra* L., *Fraxinus excelsior* L., *Tilia cordata* Mill насаджень північної частини міста Кременчука, підкресливши важливість вибору видів, що ефективно акумулюють забруднювачі у своїй біомасі.

Досліджуючи тему фітореMediaції, Rascio та Navari-Izzo (2011) розглянули механізми гіперакумуляції важких металів рослинами та їх біохімічні особливості, які роблять ці види актуальними для використання на забруднених територіях [2, с. 169–181]. Автори акцентують увагу на складних процесах накопичення металів у тканинах рослин та їх ролі в захисті екосистем від токсичних речовин.

Важливим інструментом оцінки адаптаційних можливостей видів дерев в урбанізованих середовищах є індекс толерантності до забруднення повітря (ІТЗП). Дослідження Molnár та співавторів (2018) демонструє ефективність застосування цього індексу для оцінки придатності дерев до використання у міському озелененні та відновленні екологічної рівноваги [3, с. 367–378]. Результати показали, що врахування ІТЗП дозволяє вибрати види рослин, здатні не лише виживати в умовах забруднення, а й активно поглинати і нейтралізувати речовини з токсичною дією.

Підсумовуючи наявні знання щодо фітореMediaції, Pulford та Watson (2003) провели комплексний огляд використання видів родів *Populus*, *Salix*, *Betula*, *Acer*, *Pinus* та *Robinia pseudoacacia* для ремедіації ґрунтів, забруднених важкими металами, підкреслюючи переваги таких видів у відновленні екологічного балансу, а також проблеми, пов'язані з вибором оптимальних видів і методів їх застосування [4, с. 529–540].

Окрему увагу останні дослідження приділяють ролі інвазійних та місцевих деревних видів у контексті відновлення лісових екосистем після масштабних руйнувань, зокрема повоєнних. Вишенська та Козак (2024) розглядають екологічні характеристики природних і інвазійних видів, їх переваги та ризики, а також необхідність збалансованого використання цих видів для підтримки біорізноманіття і стійкості екосистем [5, с. 33–39].

Отже, аналіз останніх досліджень свідчить про високий потенціал деревних видів, зокрема робінії несправжньоакації та клена гостролистого, у біореMediaції і озелененні міст є особливо актуальним для міста Дніпро. Водночас важливо враховувати екологічні ризики, пов'язані з використанням інвазійних видів, і спрямовувати зусилля на баланс між екологічною ефективністю та збереженням місцевого біорізноманіття.

Постановка завдання. Метою даної роботи було проаналізувати здатність *R. Pseudoacacia* та *A. Platanoides* паркових насаджень м. Дніпро до акумуляції у біомасі асиміляційного апарату металічних елементів Мангану (Mn), Феруму (Fe), Кобальту (Co) та Нікелю (Ni).

Виклад основного матеріалу дослідження. *Сбір дослідних зразків біомаси.*

Сбір біомаси листя було здійснено на семи локаціях паркових зон міста Дніпро – Парк Т.Г. Шевченка (48°27'40" N, 35°04'21" E), парк Лазаря Глоби (48°28'11" N, 35°01'48" E), сквер Металургів (48°28'26" N, 34°59'31" E), Ботанічний сад Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара (48°26'14" N, 35°02'35" E), парк Зелений гай (48°26'10" N, 35°00'35" E), парк Придніпровський (48°23'59" N, 35°07'59" E), лісопарк Дружби народів (48°32'02" N, 35°05'42" E) протягом вегетаційного періоду 2023 року. Дослідні дерева входили до однієї вікової групи середньовічних дерев (30–50 років) та мали схожі морфологічні характеристики. Ознак пошкодження біотичними агентами дослідні дерева не мали, оброблення будь якими хімічними препаратами не здійснювалось.

Визначення вмісту важких металів у біомасі.

Біомасу відібраного листя з обох досліджуваних видів висушували в сушильній шафі при температурі 60 °С протягом 24 годин. Сухі зразки листя подрібнювали до дрібного порошку за допомогою ультравідцентрового млина (Retsch ZM 1000). 100 мг кожного зразка змішували у центрифужних пробірках для зразків з 200 мкл ультрачистої води і 1,9 мл 65% нітратної кислоти. Цю суміш інкубували протягом однієї години під витяжною шафою. Потім зразки змішували з 600 мкл водного розчину 4,8% фтористоводневої кислоти і поміщали у мікрохвильову піч на 1–2 години [6]. Після мікрохвильової печі рідку фазу супернатанту доповнювали ультрачистою водою. Перед безпосереднім вимірюванням концентрації елементів у розчинах проводили розведення зразків 1:10. Вимірювання концентрації зразків здійснювали методом мас-спектрометрії, використовуючи прилад ICP-MS (model X Series 2, Thermo Fisher Scientific, Dreieich, Germany).

Вміст металічних елементів Mn, Fe, Co, Ni у біомасі рослин розраховали з урахуванням розведення та точної маси наважки відібраних зразків листя. Наведені результати представлені як середнє значення $\bar{x} \pm SD$ (стандартне відхилення). Відмінності середніх значень концентрацій елементів у біомасі рослинних зразків листя робінії та клену на різних дослідних ділянках ідентифікували за допомогою одностороннього дисперсійного аналізу (ANOVA) з використанням пакета програм Statistica (версія 8, StatSoft, США). Статистичну значущість вважали наявною при $p < 0,05$.

Результати та обговорення.

Результати детекції вмісту Co, Mn, Fe та Ni у біомасі асидіаційних органів *R. Pseudoacacia* та *A. Platanoides* з дослідних локацій зеленої інфраструктури міста наведено на рис. 1.

Вміст Co у біомасі листя *R. Pseudoacacia* коливалась у межах від 893 мкг/г (Парк Т.Г. Шевченка) до 2000 мкг/г (Парк Лазаря Глоби та Ботанічний сад ДНУ). У досліджуваній біомасі *A. Platanoides* вміст Co був дещо вищим і більш варіабельним від 1000 мкг/г (Парк Придніпровський, Парк Зелений гай) до 3400 мкг/г (Сквер Металургів). Для рослин Кобальт є необхідним мікроелементом, який бере участь у синтезі вітамінів групи B та активації ферментів. Нормальний вміст цього металічного елемента у листках деревних рослин зазвичай коливається в межах 100–1500 мкг/г. Перевищення цих значень може призводити до токсичних ефектів, таких як пригнічення росту, порушення фотосинтезу та окисний стрес.

Манган є ключовим елементом, необхідним для фотосинтетичного апарату, активації численних ферментів, а також для синтезу хлорофілу. У *R. Pseudoacacia* вміст Mn коливався від 4220 до 15170 мкг/г, тоді як у *A. Platanoides* був значно вищий – від 37470 до 104400 мкг/г. Допустимі концентрації цього елемента в листках деревних рослин зазвичай складають 200–5000 мкг/г. Перевищення цих рівнів часто веде до токсичності, пригнічення фотосинтезу та хлорозу.

Ферум є важливим для синтезу хлорофілу та функціонування ферментів, які беруть участь у диханні та метаболізмі рослин. У біомасі *R. Pseudoacacia* його вміст варіював від 8480 до 47900 мкг/г, у *A. platanoides* – від 18000 до 46120 мкг/г. Нетоксичними для рослин вважаються концентрації цього елемента 500–3000 мкг/г. Вищі рівні можуть спричиняти токсичні ефекти, зокрема окисний стрес.

Нікель є необхідним металічним елементом для активності ферменту уреаз, який бере участь у метаболізмі азоту, а також у загальній стресостійкості рослин. Оптимальні рівні Ni для деревних рослин оцінюються діапазоном 0,5–100 мкг/г. Перевищення цих значень може викликати токсичність, що

проявляється у пригніченні росту, хлорозах та некрозах листя. Концентрації Ni у біомасі листя *R. pseudoacacia* становили 180–420 мкг/г, а у *A. platanoides* – від 110 до 1270 мкг/г.

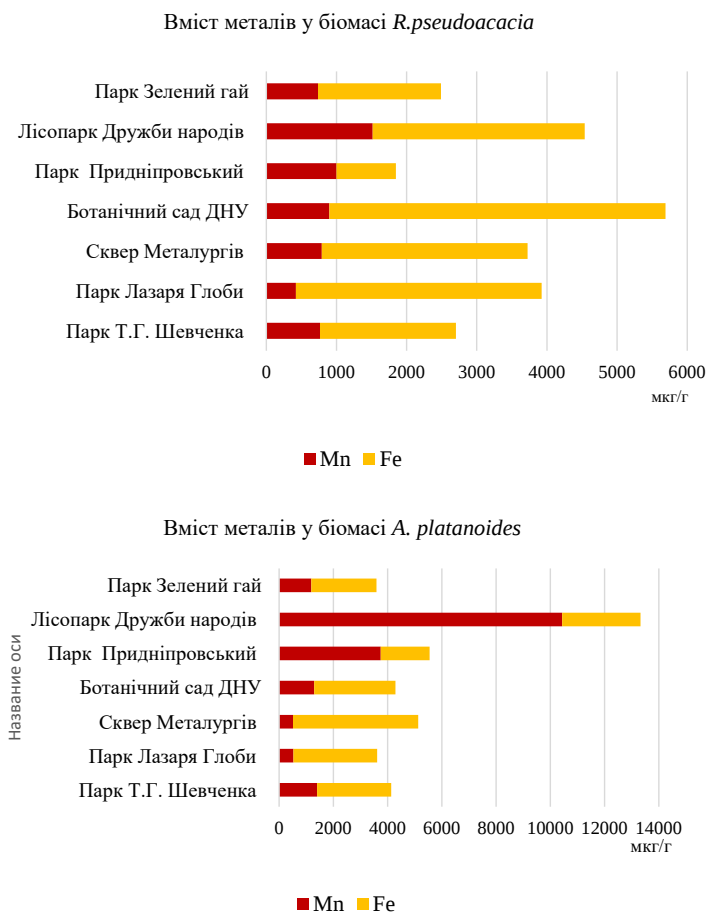


Рис. 1. Вміст металічних елементів у біомасі листя досліджуваних видів

Аналіз даних рис. 2., дозволив встановити, що у листі *R. pseudoacacia* домінує Fe, який складає 73% від загального вмісту досліджуваних металів, на другому місці Mn з 24%. Вміст кобальту Co і Ni є мінімальним – 1–2%.

Для біомаси *A. platanoides* характерна інша тенденція: найбільша частка припадає на Mn – 47%, тоді як Fe становить близько 50%. Ni і Co, як і у іншого досліджуваного виду, присутні в дуже незначних кількостях до 1–2% відповідно.

Загальні висновки.

Отримані дані свідчать про те, що *A. platanoides* має тенденцію до більшого накопичення усіх досліджуваних металічних елементів, а також про більшу варіабельність їх концентрацій у порівнянні з *R. pseudoacacia*. Обидва види активно накопичують Fe і Mn, але у робінії несправжньоакації переважає Fe, а у клена гостролистого спостерігається більш збалансований розподіл між Манганом та Ферумом. Вміст Co та Ni є незначним у біомасі обох досліджуваних видів. Це

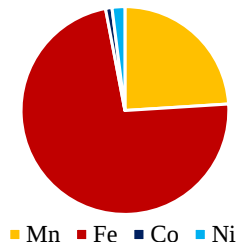
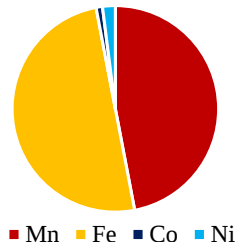
Відносний розподіл металів у
біомасі *R. pseudoacacia*Відносний розподіл металів у
біомасі *A. platanoides*

Рис. 2. Відносний розподіл металічних елементів у біомасі листя досліджуваних видів

може бути зумовлено як біологічними особливостями видів, так і впливом екологічних чинників, включно із забрудненням середовища та характеристиками ґрунту у різних парках міста Дніпро. Відмінності у їх накопиченні відображають адаптаційні механізми дерев до локальних умов міського середовища. Отримані результати підкреслюють важливість регулярного моніторингу міських зелених насаджень для оцінки їхнього екологічного стану та релевантності застосування у фіторе mediaційних технологіях.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Сараненко І. І. Екологічні особливості поглинання важких металів деревними рослинами північної частини міста Кременчука. *Біологічні системи*. 2015. Т. 7. № 2. С. 204–208.
2. Rascio N., Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant Science*. 2011. Vol. 180(2). P. 169–181. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.08.016>.
3. Molnár V. É., Tóthmérész B., Szabó Sz., Simon E. Pollution assessment in urban areas using air pollution tolerance index of tree species. *Air Pollution*. 2018. Vol. 230. P. 367–378.
4. Pulford I. D., Watson, C. Phytoremediation of heavy metal-contaminated land by trees: A review. *Environment International*. 2003. Vol. 29. P. 529–540.
5. Вишенська І., Козак О. Природні та інвазійні деревні види рослин для повоєнного відновлення лісів України. *Наукові записки НаУКМА. Біологія і екологія*. 2024. № 5. С. 33–39.
6. Wiche O., Zertani V., Hentschel W., Achziger 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. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.01.002>.