



УДК 502:630:574.4;502.53:57.044
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.21>

БІОГЕОХІМІЧНИЙ ЦИКЛ ПЛЮМБУМУ В УМОВАХ ЕКОСИСТЕМ ГРАБОВИХ ДІБРОВ СЕРЕДНЬОГО ПРИДНІПРОВ'Я

Д. В. Лукашов¹, Т. С. Тесьолкіна²

Забруднення міського атмосферного повітря є глобальною проблемою, яку визнано важливим чинником впливу на здоров'я людини. Зелені насадження та лісові екосистеми в умовах міст відіграють визначальну роль у зменшенні ступеню забруднення атмосферного повітря. Проте вони самі зазнають негативного впливу від забруднення, що може викликати фітотоксичні ефекти, зменшувати стійкість зелених насаджень до інших негативних чинників, призводити до зниження ефективності очищувальної здатності. Важкі метали, зокрема Pb, є пріоритетними забруднювачами атмосферного повітря. На відміну від інших поллютантів, важкі метали після надходження до лісової екосистеми здатні затримуватися в її компонентах, що призводить до їх поступового накопичення. Для визначення наслідків надходження Pb до екосистем зелених насаджень в умовах урбанізованого середовища необхідно провести оцінку збалансованості його біогеохімічного циклу в лісових екосистемах за різного ступеню антропогенного навантаження. Як модельні екосистеми було обрано грабові діброви двох територій природно-заповідного фонду України, що зазнають різного ступеню антропогенного впливу: НПП «Голосіївський» в межах мегаполісу міста Києва та Канівський природний заповідник, умови якого є максимально наближеними до природних. В результаті проведеного багаторічного дослідження модельних екосистем було встановлено особливості акумуляції Pb у ґрунтах, проведено оцінку величини потоків вертикальної міграції Pb лізиметричним методом, визначено рівні надходження сполук металу в процесі осадження у складі атмосферних опадів на територію грабових дібров, проведено оцінку запасів Pb у фітомасі головної деревної породи грабових дібров та динаміку накопичення сполук металу у лісовій підстилці. В результаті встановлено, що біогеохімічна система міграції Pb грабової діброви Канівського природного заповідника характеризується збалансованістю потоків металу, коли обсяги надходження Pb з атмосферними опадами та опалим листям врівноважено потоком їх втрат в процесі вимивання вертикальним стоком ґрунтових вод до елювіального шару ґрунту. Це свідчить про відсутність затримки та накопичення сполук Pb в екосистемі Канівського природного заповідника. Водночас екосистема грабової діброви НПП «Голосіївський» характеризується незбалансованістю біогеохімічного циклу Pb. Потіки надходження сполук металу з атмосферними опадами та листяним опадом не врівноважені їх втратами в процесі

¹ доктор біологічних наук, професор,
завідувач кафедри екології та зоології
(Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ)
e-mail: lukashov@knu.ua
ORCID: 0000-0002-1375-0447

² аспірантка кафедри екології та зоології
(Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ)
e-mail: t.tesolkina@knu.ua
ORCID: 0009-0008-8111-7089

вимивання вертикальним стоком ґрунтових вод, що призводить до затримки та накопичення Pb у рослинній фітомасі грабу. В результаті у забезпеченні функціонуванні біогеохімічного циклу Pb в екосистемі НПП «Голосіївський» значну роль відіграє біологічна складова системи «рослина-підстилка-ґрунт-рослина», коли 21% потоку надходження Pb до підстилки забезпечується фітосою листяного опаду.

Ключові слова: лісові екосистеми, ґрунт, атмосферне осадження, лісова підстилка, листяний опад, фітомаса, біоаккумуляція рослинами, фітотоксичність, біогеохімічний цикл мікроелементів, забруднення.

BIOGEOCHEMICAL CYCLING OF LEAD IN THE HORNBEAM FOREST ECOSYSTEMS OF THE MIDDLE DNIPRO REGION

D. V. Lukashov, T. S. Tesolkina

Urban air pollution is a globally recognized issue, significantly impacting human health. Urban green spaces and forest ecosystems play a crucial role in mitigating air pollution; however, they are themselves vulnerable to pollution, leading to phytotoxic effects, reduced resilience of vegetation to other stressors, and diminished air purification efficiency. Heavy metals, particularly lead (Pb), are among the most concerning air pollutants. Unlike other pollutants, heavy metals can be absorbed and accumulated within forest ecosystems, leading to potential long-term ecological consequences.

This study aims to evaluate the biogeochemical cycling of Pb in urban green spaces under varying levels of anthropogenic pressure. The research focuses on hornbeam groves in two areas within the Nature Reserve Fund of Ukraine: the Holosiivskiyi National Nature Park (NPP) in Kyiv, which experiences significant urban influence, and the Kaniv Nature Reserve, which is relatively undisturbed. Through long-term monitoring, we assessed Pb accumulation in soils, quantified Pb vertical migration using lysimetry, determined the levels of Pb deposition via atmospheric processes, and analyzed Pb dynamics within the forest litter and hornbeam phytomass.

Our findings reveal a balanced Pb biogeochemical cycle in the Kaniv Nature Reserve, where Pb inputs from atmospheric deposition and leaf litter are offset by losses due to leaching into deeper soil layers, indicating no significant Pb retention. Conversely, the hornbeam groves in the Holosiivskiyi NPP exhibit an imbalanced Pb cycle, with higher Pb retention in the ecosystem, particularly within the phytomass. This imbalance highlights the significant role of the biological component in maintaining the Pb cycle in urban forests, with 21% of Pb in the litter derived from leaf litterfall in the Holosiivskiyi NPP.

Key words: forest ecosystems, soil, atmospheric deposition, forest litter, leaf litterfall, phytomass, bioaccumulation by plants, phytotoxicity, microelement biogeochemical cycle, pollution.

Вступ

Забруднення атмосферного повітря збільшує короткостроковий та довгостроковий ризик розвитку серцево-судинних і респіраторних захворювань міського населення. За оцінками забруднення повітря щорічно спричиняє у світі понад 4 мільйони передчасних випадків смертей (Diener & Mudu, 2021). Зелені насадження, як один із елементів урбанізованого середовища, відіграють значну роль у покращенні екологічного стану міст. Рослинність в урбоекосистемах, крім регуляції мікроклімату, захисту від шумового забруднення та поліпшення естетичного вигляду міського середовища, відіграє важливу роль у зменшенні забруднення повітря (Chen et al., 2016).

Водночас у результаті поглинання полутантів з атмосферного повітря лісові екосистеми нагромаджують важкі метали, що може змінювати збалансованість біоге-

охімічних циклів хімічних елементів та призводити до їхнього накопичення в екосистемах, що призводить до появи фітотоксичних ефектів, що негативно впливають на функціональний стан зелених насаджень. Незважаючи на те, що основним забруднювачем повітря, який має негативний вплив на ліси, виступає O₃, важкі метали завдяки здатності до накопичення у компонентах лісових екосистем можуть призводити до їх хронічного забруднення (Percy & Ferretti, 2004). Дослідженнями показано дефоліацію міських вічнозелених насаджень у періоди максимального забруднення повітря під час опалювального періоду (Diener & Mudu, 2021). Таким чином, зелені насадження у містах та лісові екосистеми у передмісті зазнають вираженого фітотоксичного впливу важких металів, що потребує оцінки біогеохімічних циклів їх міграції з метою прогнозування стійкості угрупо-

вань зелених насаджень (Риженко, 2018). У результаті поглинання рослинами важких металів з атмосфери та їх подальшого надходження з листяним опадом показано суттєве зростання їх концентрації у лісовій підстилці та подальше потрапляння до ґрунту, що зумовлює можливість їх міграції до ґрунтових вод та доступність для кореневого поглинання рослинами, що становить потенційну загрозу для нормального функціонування лісових екосистем (Scheid et al., 2009; Maksimtsev et al., 2021; Montemagno et al., 2022).

Грабові діброви є зональним типом широколистяних лісових екосистем Середнього Придніпров'я, які відіграють важливу природоохоронну роль (Воробйов та ін., 2008). Водночас показана надзвичайна ефективність насаджень грабу в умовах лінійних захисних лісосмуг на узбіччях доріг для очистки повітря від Zn та Cu (Maksimtsev et al., 2021). В умовах грабово-дубової діброви саме граб звичайний (*Carpinus betulus*) має найвищі рівні накопичення важких металів Cu, Zn, Ni, Co, Cr, Pb, у порівнянні з дубом та кизилом (Kaszala et al., 2003). Показано, що цей вид має високий потенціал для дендроремедіації забруднених ґрунтів Pb та Zn (Halasz et al., 2022). Таким чином, екосистеми грабових дібров є зручною моделлю для встановлення закономірностей функціонування біогеохімічних систем міграції важких металів та визначення критеріїв їх стійкості до поліметалічного забруднення.

Метою представлено дослідження була оцінка збалансованості біогеохімічного циклу Pb в умовах екосистем грабових дібров Середнього Придніпров'я, що зазнають різного ступеню антропогенного впливу. Для цього було сплановано та реалізовано

багаторічне комплексне дослідження, що включало такі етапи:

1. Встановлення особливостей розподілу Pb по ґрунтових горизонтах та оцінка лізиметричним аналізом величини вертикальної міграції в процесі інфільтрації ґрунтових вод.

2. Визначення концентрації Pb у складі атмосферних опадів та оцінка річних обсягів вологого осадження в межах модельних лісових екосистем.

3. Аналіз динаміки накопичення Pb у фітомасі грабу та кількісна оцінка потоків надходження металу у складі листяного опаду до лісової підстилки та ґрунту.

4. Визначення особливостей накопичення Pb у складі лісової підстилки з метою оцінки її ролі у процесах міграції металу в системі «листя-підстилка-ґрунт».

5. Оцінка збалансованості біогеохімічної системи міграції Pb у модельних лісових екосистемах та визначення екологічних чинників, що визначають особливості її функціонування.

Матеріал та методи

Для проведення дослідження було обрано дві модельні екосистеми грабових дібров природно-заповідного фонду України – Національний природний парк «Голосіївський», що є унікальним лісовим масивом у межах мегаполісу міста Києва, та Канівський природний заповідник, що є одним з найстаріших лісових заповідників України та, відповідно, представляє умови, максимально наближені до природних. Модельні виділи обраних лісових екосистем грабових дібров заповідних територій є подібними за даними таксаційного опису (табл. 1).

Атмосферні опади збирали за допомогою дощових колекторів, розміщених під поло-

Таблиця 1
Таксаційний опис модельних лісових екосистем та показники їхньої біологічної продуктивності

Квартал/ виді	Площа, га	Характеристика деревостану	Ярус	Вік, роки	Висота, м	Діаметр, см	Клас бонітету	Тип лісу	Повнота	Запас деревини, м ³ /га	Запаси фітомаси головної деревної породи, т/га				Річний приріст фітомаси, т/га
											Стовбур з корою	Гілки	Листя	Коріння	
НПП «Голосіївський»															
26/9	0,8	10ГЗ	1	70	25	28	I	Д2ГД	0,70	320	282,1	45,5	9,3	98,4	2,76
Канівський природний заповідник															
15/2	7,0	10ГЗ	1	100	25	28	II	Д1ГД	0,70	300	259,7	45,2	7,9	88,6	1,06

гом лісу на рівні землі через кожні 2 м від стовбуру найбільшого дерева по 4–8 шт. згідно (Laskowski et al., 1995). Колектори були побудовані з пластикових контейнерів і лійок діаметром 13 см. Лійки були захищені від потрапляння твердих частинок поліпропіленовою сіткою з вічком 5×5 мм. Відбір води для аналізу у холодний період року проводили щомісяця, у випадку рясних дощів та у літні місяці – протягом доби після завершення опадів.

Для оцінки вертикального ґрунтового стоку було використано стаціонарні тарічасті лізиметри з нульовою напругою (zero-tension pan lysimeter), які є простим та ефективним засобом для вимірювання *in situ* руху ґрунтових вод та розчинених речовин (Schmidt & Henry, 2008; Makowski et al., 2020). Лізиметри виготовлені із сантехнічного поліпропілену без використання металевих деталей. Площа одного лізиметра становила 0,1 м². На кожній ділянці було розміщено по 4 лізиметри на глибині 10–12 см для збору вертикального стоку ґрунтових вод з гумусового горизонту ґрунту. Зразки ґрунтових вод з лізиметрів відбирали після інтенсивних опадів протягом вегетаційного сезону або по мірі їх наповнення один раз на місяць.

Проби води атмосферних опадів та лізиметричних вод фільтрували через паперовий фільтр ФС «біла стрічка» (діаметр пор 7–20 мкм) та концентрували шляхом випарювання 1 л до 10 мл на піщаній бані без доведення до кипіння з додаванням 1 мл 4 н HNO₃ («осч») на 1 л проби (Набиванець та ін., 1996).

Пробні площадки для відбору зразків ґрунту визначали згідно ДСТУ ГОСТ 17.4.3.01:2019. Точкові проби відбирали методом «конверту» на трьох ділянках 3×3 м з двох генетичних горизонтів – гумусового на глибині 5 см та елювіального на глибині 20–25 см. Для визначення концентрації важких металів застосовували екстракцію *aqua regia* шляхом обробки 0,5 г кожного зразка ґрунту сумішшю 2 мл HNO₃ і 6 мл HCl протягом 2 годин згідно ДСТУ ISO 11466:2001 (Tisserand et al., 2024).

Проби лісової підстилки відбирали протягом 2020–2023 рр. щомісячно у період з 15 по 20 числа з ділянок 1×1 м. Зібраний матеріал висушували за кімнатної температури та зважували з метою визначення запасу підстилки. Частину проби підстилки використовували для визначення фракційного складу, відокремлюючи опале листя,

гілки, кору, насіння та недиференційовану ферментовану масу (труху). Зразки листяної фітомаси грабу збирали вручну з приземних гілок або, за можливості, з впалих дерев та гілок. Зразки деревини відбирали з дерев або великих скелетних гілок діаметром понад 10 см, що впали протягом 1–2 місяців.

Висушені зразки фітомаси та лісової підстилки озольовали протягом 12 год при 450°C. Отриману золу кип'ятили у 15 мл 4 М HNO₃ («осч») протягом 30 хв., після чого розчин фільтрували через паперовий фільтр. Фільтр двічі промивали дистильованою водою до досягнення об'єму 10 мл.

Визначення концентрації важких металів проводили на базі кафедри екології та зоології ННЦ «Інститут біології та медицини» за допомогою атомно-адсорбційного спектрофотометру С115-М1 (SELMI, Україна). Аналіз здійснювали шляхом безпосереднього введення рідкої проби у полум'я ацетилен-повітря. Для компенсації неселективного поглинання полум'я використовували дейтерієвий коректор фону. Реєстрацію аналітичних показників проводили за допомогою комп'ютерно-аналітичного комплексу КАС-101. Також зразки за 2020–2021 рр. було проаналізовано методом оптико-емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою (ICP-OES, iCAP 6000 ICP Spectrometer, Thermo Fisher Scientific Corporation) в Інституті ботаніки Ганноверського університету імені Готфріда Вільгельма Лейбніца (Turcios et al., 2021). Концентрацію Pb у твердих зразках (ґрунт, підстилка, рослинний матеріал) представляли у мг/кг маси сухої речовини, у воді атмосферних опадів – у мкг/л, ґрунтових водах – у мг/л.

Середні величини представляли як середнє арифметичне (X), їх мінливість оцінювали як стандартне відхилення (середнє квадратичне відхилення, SD). Нормальність розподілу даних встановлювали за допомогою критерію *Shapiro – Wilk's W-test* як найбільш чутливого (Conti et al., 2005). Оскільки більшість вимірів була обмеженою за кількістю (3–5 вимірів), то для парного порівняння середніх вибірових величин застосовували непараметричний *Mann-Whitney U-test* з рівнем значимості $p < 0,05$, як найбільш потужний для малих вибірок (Guidance ..., 2002). Встановлення статистичної значущості відмінностей між кількома вибірками проводили за допомогою тесту *one-way ANOVA*.

Результати

Для концентрації Pb у ґрунті була характерна відсутність суттєвих відмінностей за розподілом по генетичних горизонтах досліджених екосистем: в умовах екосистеми грабової діброви НПП «Голосіївський» концентрація Pb в гумусовому та елювіальному шарах становила $24,7 \pm 9,3$ мг/кг та $25,5 \pm 3,5$ мг/кг відповідно; у ґрунті екосистеми Канівського природного заповідника – $19,6 \pm 2,1$ мг/кг та $20,1 \pm 4,5$ мг/кг. Можна бачити, що концентрація Pb у ґрунті НПП «Голосіївський» є вищою у 1,3 рази у порівнянні з Канівським природним заповідником. Водночас концентрація Pb у матеріалі лісової підстилки була суттєво нижчою: в умовах НПП «Голосіївський» відповідала діапазону $3,15$ – $10,56$ мг/кг, в Канівському природному заповіднику була у $1,9$ – $2,8$ раз меншою – $1,69$ – $4,00$ мг/кг.

Концентрація Pb в гумусовому та елювіальному шарах ґрунту обох екосистем суттєво (для НПП «Голосіївський» – у 1,4 рази) перевищувала величину середнього вмісту Pb у ґрунтах орних земель України, яка встановлена на рівні $17,3$ мг/кг (Клос, 2012). Також концентрація Pb у ґрунтах екосистеми НПП «Голосіївський» у 1,2 рази перевищувала фонові величини для орних земель на місці хвойних та широколистяних лісів, що визначені в середньому на рівні $20,5$ мг/кг (діапазон $6,8$ – $66,0$ мг/кг) (Єгорова, 2014). Водночас за даними А.І. Самчука та ін. (Самчук та ін., 2019) середній валовий вміст Pb у Голосіївському лісі становив 43 мг/кг, що суттєво вище, ніж зафіксовані нами концентрації металу.

Розрахунок запасів Pb в ґрунтах екосистеми НПП «Голосіївський» показав, що у гумусовому горизонті зосереджено $1,5 \pm 0,6$ г/м² ($14,8$ кг×га⁻¹), в елювіальному горизонті – $5,7 \pm 0,8$ г/м² ($57,3$ кг×га⁻¹). У Канівському природному заповіднику в гумусовому горизонті містилося $1,2 \pm 0,1$ г/м² ($11,8$ кг×га⁻¹) даного металу, в елювіальному – $4,5 \pm 1,0$ г/м² ($45,2$ кг×га⁻¹).

Лізиметричний аналіз ґрунтових вод дозволив оцінити величину потоків вертикальної міграції важких металів до елювіального горизонту ґрунту досліджених екосистем. Величина ґрунтової інфільтрації для грабової діброви НПП «Голосіївський» становила $13,5$ л/м² (135 м³×га⁻¹), для Канівського природного заповідника – $29,3$ л/м² (293 м³×га⁻¹). У результаті встановлено, що в умовах Канівського природного заповідника вимивання Pb з гумусового горизонту проходить

у 1,6 рази більш інтенсивно, втрати якого протягом року становлять 56 г×га⁻¹×рік⁻¹ проти 35 г×га⁻¹×рік⁻¹ в НПП «Голосіївський».

Відомо, що вологе осадження з атмосферними опадами є основним шляхом надходження важких металів до наземних екосистем (Hůnová et al., 2023). При цьому саме транскордонне перенесення атмосферних мас та процеси вологого осадження визначають надходження більшості хімічних елементів до європейських лісових екосистем (Tyler & Olsson, 2006; Connan et al., 2013). Концентрація Pb у воді атмосферних опадів на території НПП «Голосіївський» була вищою у $1,4$ – $1,7$ разів та в середньому становила $10,0 \pm 1,9$ мкг/л. Для екосистеми Канівського природного заповідника середня концентрація Pb в атмосферних опадах дорівнювала $6,0 \pm 0,7$ мкг/л. Визначена середня концентрація Pb у досліджених екосистемах в цілому відповідала діапазону концентрації Pb для фонових територій Франції, що становила $1,1$ – $6,5$ мкг/л (Connan et al., 2013).

Відповідно до даних таксаційного опису модельних виділів обраних лісових екосистем грабових дібров заповідних територій встановлено, що запаси деревини в НПП «Голосіївський» та Канівському природному заповіднику є близькими та становлять 320 м³/га та 300 м³/га відповідно. Водночас за величиною щорічного приросту деревної фітомаси грабова діброва НПП «Голосіївський» характеризувалася у 2,6 рази вищою продуктивністю, що становила $2,8$ т/га, у той час як для Канівського природного заповідника вона складала $1,1$ т/га (див. табл. 1). Аналіз сезонної динаміки концентрації важких металів у деревині грабу показав відсутність статистично значимих відмінностей протягом року. Середня концентрація Pb у деревині грабу НПП «Голосіївський» становила $3,72 \pm 0,32$ мг/кг, у Канівському природному заповіднику концентрація вона була у 2,2 рази нижчою та становила $1,66 \pm 0,23$ мг/кг. Для оцінки запасів накопиченого Pb у деревній фітомасі було умовно прийнято, що його концентрація суттєво не відрізняється у складі деревини стовбурів, гілок та коріння (частину зразків деревини було отримано з великих скелетних гілок). Для екосистеми НПП «Голосіївський» встановлено, що у деревині грабу було зосереджено високі запаси Pb, що оцінюються у $1,59 \pm 0,14$ кг×га⁻¹, у Канівському природному заповіднику вони були суттєво меншими та становили $0,66 \pm 0,02$ кг×га⁻¹. Відповідно величина накопи-

чення Pb у річному прирості деревини грабу в НПП «Голосіївський» становила $10,3 \pm 0,9$ $\text{г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, у Канівському природному заповіднику – $1,8 \pm 0,1$ $\text{г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$.

Концентрація Pb у листяній фітомасі грабу в умовах НПП «Голосіївський» протягом вегетаційного сезону відповідала діапазону 3,16–4,45 мг/кг, в Канівському природному заповіднику була у 3,7–4,5 рази меншою – 0,69–1,19 мг/кг. В умовах лісового заповідника «Łipny Dół» (Польща) листя грабу на кінець вегетаційного сезону накопичувало 7,27 мг/кг (Laskowski & Berg, 1993). Листя клену та липи у центрі Вроцлава та Валбжиха у червні накопичували Pb відповідно 0,49–0,85 мг/кг та 1,4–9,5 мг/кг. Станом на жовтень концентрація Pb суттєво підвищувалася і досягала у листі клену 4,9–8,0 мг/кг, у листі липи – 6,5–12,4 мг/кг (Piczak et al., 2003).

На початок вегетаційного сезону у молодому листі грабу в умовах обох лісових екосистем концентрація Pb є найменшою (рис. 1). У молодому листі грабу Голосіївського лісу концентрація металу становила $3,16 \pm 0,32$ мг/кг, у Канівському природному заповіднику – $0,69 \pm 0,74$ мг/кг. У подальшому спостерігалася поступове накопичення Pb у листяній фітомасі грабу, що досягало максимуму в осінній період під час опадання листя: в умовах НПП – до $4,45 \pm 0,15$ мг/кг (у 1,4 рази більше у порівнянні з травнем), у Канівському заповіднику – $1,08 \pm 1,10$ мг/кг (у 1,5–1,6 разів більше). Подібне зростання концентрації Pb зафіксовано для різних видів дерев багатьма авторами (Kim & Fergusson, 1994; Piczak et al., 2003; Shahid et al., 2017). Зростання концентрації Pb у фітомасі рослин пояснюється його активним накопи-

ченням з атмосферних опадів. Показано, що проникнення та накопичення позако-реневого Pb у пагонах *Lactuca sativa* сильно корелювало (коефіцієнт кореляції: 0,83) з кількістю опадів (Schreck et al., 2014). При чому накопичення Pb листяною фітомасою відбувається більш активно з атмосферних опадів, ніж при сухому осадженні твердих частинок пилу (Lawson & Mason, 2001).

Для оцінки обсягів надходження листяного опаду було використано результати аналізу сезонної динаміки компонентного складу лісової підстилки досліджених грабових дібров НПП «Голосіївський» за 2021 р. та Канівського природного заповідника за 2021–2022 рр. з припущенням, що маса опалого листя суттєво не змінюється протягом місяця після його надходження до складу підстилки (табл. 1, 2). Розрахунки кількості листяного опаду, що надійшов протягом року до складу підстилки обох екосистем, показали близькі величини: для НПП «Голосіївський» 3200 $\text{кг} \times \text{га}^{-1}$, для Канівського природного заповідника – $2500 \text{--} 3600$ $\text{кг} \times \text{га}^{-1}$. Проте, через суттєві відмінності у концентрації Pb у листяній фітомасі обсяги надходження металу з листяним опадом суттєво відрізнялися та становили для НПП «Голосіївський» у 2021 р. $13,8 \pm 0,6$ $\text{г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, для Канівського природного заповідника у 2022 р. – $3,9 \pm 0,6$ $\text{г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$.

Протягом року сумарне накопичення Pb лісовою підстилкою грабової діброви НПП «Голосіївський» становило $65,2 \pm 34,6$ $\text{г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, що відповідає величині надходження металу до екосистеми НПП «Голосіївський» у складі листяного опаду та його вологого осадження з атмосфери – $64,6 \pm 5,9$ $\text{г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$ (табл. 2). З них 79% формувалося за рахунок вологого осадження Pb у складі атмо-

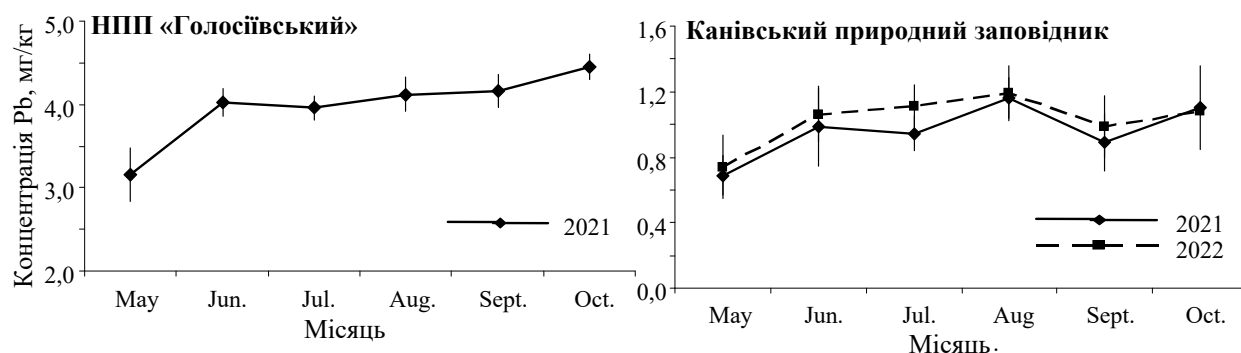


Рис. 1. Динаміка концентрації Pb у листяній фітомасі грабу протягом вегетаційного сезону в умовах екосистеми НПП «Голосіївський» та Канівського природного заповідника

Таблиця 2
Баланс обсягів надходження та вивільнення Рb у структурі біогеохімічного циклу екосистеми грабової діброви
НПШ «Голосіївський»

Місяць	Запас Рb, г×га ⁻¹		Накопичення підстилкою/ вивільнення Рb з підстилки, г×га ⁻¹		Сумарне надходження Рb (листяний опад + атмосферні опади), г×га ⁻¹		Надходження Рb з листяним опадом, г×га ⁻¹		Надходження Рb з атмосферними опадами, г×га ⁻¹		Ґрунтовий стік Рb, г×га ⁻¹	
	X	SD	X	SD	X	SD	X	SD	X	SD	X	SD
01.2021	107,8	5,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02.2021	102,1	4,5	-5,7	-	4,4	-	-	4,4	0,7	8,1	1,0	-
03.2021	104,2	4,9	2,1	-	2,6	-	-	2,6	0,8	-	-	-
04.2021	106,0	3,9	1,9	-	4,8	-	-	4,8	0,6	-	-	-
05.2021	97,2	7,2	-8,8	-	10,0	-	-	10,0	1,0	7,9	1,0	-
06.2021	69,9	8,6	-27,4	7,9	0,6	-	0,1	0,6	0,1	8,5	1,0	-
07.2021	26,5	7,8	-43,3	8,2	11,7	-	1,2	11,7	1,2	1,4	0,2	-
08.2021	39,1	9,9	12,6	8,8	7,8	4,5	1,5	3,2	1,2	5,6	0,7	-
09.2021	32,9	6,7	-6,3	8,3	3,9	1,7	0,6	2,2	0,6	-	-	-
10.2021	36,2	9,3	3,4	8,0	5,8	5,8	0,2	-	-	-	-	-
11.2021	41,7	4,3	5,4	6,8	11,4	0,4	2,1	10,9	2,1	-	-	-
12.2021	72,7	5,3	31,0	4,8	1,6	1,3	0,1	0,3	0,1	3,9	0,5	-
01.2022	81,5	7,1	8,9	6,2	0,1	-	-	0,1	0,1	-	-	-
Загальне накопичення г×га ⁻¹ ×рік ⁻¹	65,2	34,6	64,6	13,8	5,9	0,6	50,8	6,4	-	-	-	-
Загальне вивільнення, г×га ⁻¹ ×рік ⁻¹	-91,5	24,4	-	-	-	-	-	-	-	35,2	4,3	-
Накопичення Рb у річному прирості деревини, г×га ⁻¹ ×рік ⁻¹	10,3	0,9										
Запаси Рb у деревній фітомасі, г×га ⁻¹	1587	137										
Запаси Рb у 0-5 см шарі ґрунту, г×га ⁻¹	14846	5557										
Запаси Рb у 5-20 см шарі ґрунту, г×га ⁻¹	57264	7771										

ферних опадів ($50,8 \pm 6,4 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$) та 21% припадало на кількість металу, що надійшла у складі опалого листя ($13,8 \pm 0,6 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$). Таким чином, основним шляхом надходження Pb до екосистеми НПП «Голосіївський» виступають процеси волого осадження з атмосфери.

Сумарне вивільнення Pb з підстилки грабової діброви НПП «Голосіївський» протягом року оцінюється у $91,5 \pm 24,4 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, що у 1,4 рази більше, ніж кількість накопиченого металу ($65,2 \pm 34,6 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$). Загальні річні втрати Pb лісовою підстилкою перевищують його надходження на $26,3 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$. Аналіз балансу втрат металу з обсягами його надходженням за окремими місяцями показав, що лісова підстилка найбільш активно втрачає Pb протягом травня–липня, коли відбувається стрімке скорочення її запасів внаслідок процесів мінералізації. При цьому втрати Pb екосистемою з вертикальним стоком ґрунтових вод за рік становили $35,2 \pm 4,3 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, що не покриває величину надходження металу у складі атмосферних опадів – $51 \pm 6 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$. Це свідчить про можливу затримку Pb у ґрунті у формі малорухомих сполук, що підтверджується суттєво вищою концентрацією металу у гумусовому та елювіальному шарах. Іншим механізмом накопичення Pb в екосистемі є його фіксація у складі річного приросту деревини, що становить $10 \pm 1 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$.

Величина загального накопичення Pb у лісовій підстилці грабової діброви Канівського природного заповідника за рік становила $22,0 \pm 3,8 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$ (табл. 3). Оцінка загальних втрат Pb підстилкою за рік дає близьку величину – $27,7 \pm 3,7 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, що статистично значимо не відрізняється від показника загального накопичення металу. Це свідчить про збалансований стан функціонування біогеохімічної системи Pb грабової діброви Канівського природного заповідника, коли обсяги надходження металу до підстилки врівноважено процесами його вивільнення.

Розрахунок загального річного надходження Pb до екосистеми Канівського природного заповідника в результаті вологого осадження з атмосфери та листяним опадом дає величину $53,5 \pm 3,6 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, з яких 93% припадає на вологе осадження у складі атмосферних опадів ($49,6 \pm 3,0 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$). Кількість металу, що надійшла у складі опалого листя, становить лише 7% від обсягів надходження ($3,9 \pm 0,6 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$). Порівняння величин вологого осадження Pb

з атмосфери ($46,9 \pm 3,0 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$) та ґрунтового стоку до елювіального шару ґрунту ($56,1 \pm 6,3 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$) вказує на наявність балансу між надходженням та втратами металу екосистемою. Фіксація Pb у річному прирості деревної фітомаси грабу у загальному балансі металу в екосистемі є несуттєвою та становить $1,8 \pm 0,1 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$.

Обговорення

Співставлення величин потоків Pb в умовах модельних екосистем грабових дібров вказує, що величина загального надходження металу протягом року є подібною та становить для НПП «Голосіївський» $65 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, для Канівського природного заповідника – $54 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$. Водночас, враховуючи, що основним шляхом вивільнення металу з екосистеми є ґрунтовий стік, в умовах НПП «Голосіївський» спостерігається незбалансованість біогеохімічного циклу Pb, коли втрати металу з ґрунтовою інфільтрацією неповністю покривають його надходження до екосистеми з атмосферними опадами (рис. 2). Інтенсивність потоку вертикальної міграції Pb ґрунтовими водами в екосистемі грабової діброви НПП «Голосіївський» є у 1,6 рази нижчою та становить $35 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$ проти $56 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$ у Канівському природному заповіднику. Це може призводити до затримки та накопичення Pb в екосистемі НПП «Голосіївський». Можна бачити, що у лісовій підстилці НПП «Голосіївський» запаси Pb становлять $65 \text{ г} \times \text{га}^{-1}$, у Канівському природному заповіднику вони є у 3 рази меншими – $22 \text{ г} \times \text{га}^{-1}$. При цьому сумарні запаси сполук металу у ґрунті модельних екосистем відрізняються лише у 1,2 рази: у НПП «Голосіївський» $72,1 \text{ кг} \times \text{га}^{-1}$, у Канівському природному заповіднику – $57,0 \text{ кг} \times \text{га}^{-1}$, що свідчить про головну роль лісової підстилки у накопиченні та регулюванні міграції Pb в екосистемах грабових дібров Середнього Придніпров'я.

Основні відмінності досліджених екосистем були виявлені за параметрами накопичення Pb у фітомасі грабу. Запаси Pb у листяній фітомасі екосистеми грабової діброви НПП «Голосіївський» є вищими у 3,5 рази та оцінені у $14 \text{ г} / \text{га}$ проти $4 \text{ г} / \text{га}$ у Канівському природному заповіднику. Відмінності запасів у фітомасі деревини становили 2,4 рази – $1,6 \text{ кг} / \text{га}$ та $0,7 \text{ кг} / \text{га}$ відповідно. Як наслідок високого вмісту Pb у листяній фітомасі, в екосистемі НПП «Голосіївський» листяний опад має більш суттєвий внесок до потоку надходження Pb до лісової підстилки – 21%, ніж в умовах Канівського природного запо-

Таблиця 3
Баланс обсягів надходження та вивільнення Рb у структурі біогеохімічного циклу екосистеми грабової діброви Канівського природного заповідника

Місяць	Запас Рb, г×га ⁻¹		Накопичення підстилкою/ вивільнення Рb з підстилки, г×га ⁻¹		Сумарне надходження Рb (листяний опад + атмосферні опади), г×га ⁻¹		Надходження Рb з листяним опадом, г×га ⁻¹		Надходження Рb з атмосферними опадами, г×га ⁻¹		Ґрунтовий стік Рb, г×га ⁻¹	
	X	SD	X	SD	X	SD	SD	SD	X	SD	X	SD
06.2022	27,9	3,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
07.2022	26,4	4,5	-1,5	4,2	3,7	0,5	0,1	0,0	3,5	0,4	7,2	0,8
08.2022	16,2	4,1	-10,2	4,3	4,6	0,6	0,4	0,0	4,2	0,5	-	-
09.2022	18,7	4,2	2,5	4,2	3,0	0,4	0,6	0,1	2,3	0,3	19,9	2,2
10.2022	26,8	3,9	8,1	4,0	4,5	0,6	1,3	0,2	3,3	0,4	-	-
11.2022	36,5	3,0	9,7	3,4	4,9	0,6	0,9	0,2	4,0	0,5	11,2	1,3
12.2022	36,2	4,8	-0,3	3,9	5,0	0,6	0,5	0,1	4,4	0,5	13,3	1,5
01.2023	34,8	5,3	-1,4	5,1	2,6	0,3	-	-	2,6	0,3	-	-
02.2023	34,2	4,0	-0,6	4,7	4,1	0,5	-	-	4,1	0,5	-	-
03.2023	36,0	3,2	1,8	3,6	2,5	0,3	-	-	2,5	0,3	-	-
04.2023	35,8	3,0	-0,1	3,1	3,9	0,5	-	-	3,9	0,5	-	-
05.2023	34,6	4,5	-1,2	3,7	5,9	0,7	-	-	5,9	0,7	4,5	0,5
06.2023	28,9	4,4	-5,7	4,4	4,9	0,6	-	-	4,9	0,6	-	-
07.2023	21,6	3,7	-7,3	4,0	3,9	0,5	-	-	3,9	0,5	-	-
Загальне накопичення г×га ⁻¹ ×рік ⁻¹	22,0	3,8	-27,7	3,7	53,5	3,6	3,9	0,6	49,6	3,0	-	-
Загальне вивільнення, г×га ⁻¹ ×рік ⁻¹	-27,7	3,7									56,1	6,3
Накопичення Рb у річному прирості деревини, г×га ⁻¹ ×рік ⁻¹	1,8	0,1										
Запаси Рb у деревній фітомасі, г×га ⁻¹	655,0	15,4										
Запаси Рb у 0-5 см шарі ґрунту, г×га ⁻¹	11777	1282										
Запаси Рb у 5-20 см шарі ґрунту, г×га ⁻¹	45222	10119										

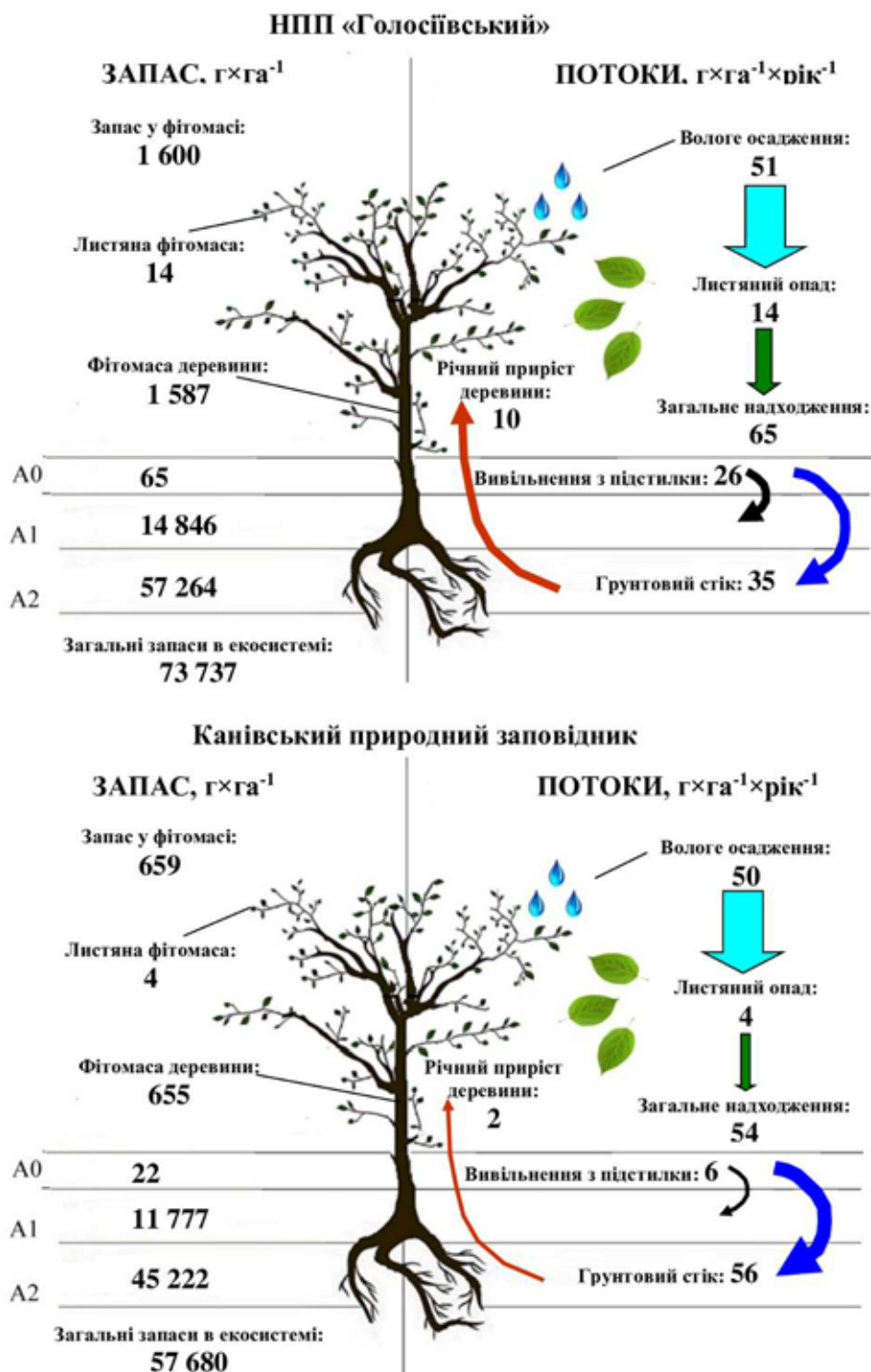


Рис. 2. Схема біогеохімічного циклу Рb в екосистемах грабових дібров НПП «Голосіївський» та Канівського природного заповідника

відника, де його внесок забезпечує надходження 7% від загальної кількості металу. Таким чином, у функціонуванні біогеохімічного циклу Рb в умовах НПП «Голосіївський» більш суттєву роль відіграє біологічна складова у вигляді процесів акумуляції сполук металу у листяній фітомасі (як в результаті кореневого поглинання з ґрунту, так і атмо-

ферного осадження на поверхню листя), його надходження до лісової підстилки у складі листяного опаду та подальшого накопичення Рb у деревині. Все це свідчить не лише про підвищений вміст Рb у компонентах лісової екосистеми НПП «Голосіївський», а й про доступність сполук Рb для рослин, що створює небезпеку виникнення фітотоксичних

ефектів для головної деревної породи грабової діброви НПП «Голосіївський» (Риженко, 2018; Maksimtsev et al., 2021).

В умовах грабової діброви Канівського природного заповідника, незважаючи на близькі величини сумарного надходження сполук Pb, можна бачити, що біологічна складова біогеохімічного циклу є несуттєвою, а основний потік металу відбувається в системі «атмосфера-грунт-підстилка-грунтові води». Причому основним шляхом надходження Pb також виступають атмосферні опади, які забезпечують формування 93% загального потоку металу до екосистеми, що було показано для інших лісових екосистем Європи (Kim & Fergusson, 1994; Laskowski et al., 1995; Virzo et al., 2002). Слід відмітити, що в умовах екосистеми НПП «Голосіївський» вологе осадження у складі атмосферних опадів забезпечувало надходження до екосистеми близької кількості металу, що може свідчити про однакові регіональні особливості хімічного складу атмосферних опадів. У результаті можна зробити висновок, що біогеохімічний цикл екосистеми грабової діброви Канівського природного заповідника є збалансованим, коли обсяги надходження металу до екосистеми врівноважено потоками його втрати в результаті вертикального стоку з ґрунтовими водами. При цьому накопичення Pb у фітомасі габу є несуттєвим, що свідчить про стійкість екосистеми грабової діброви Канівського природного заповідника до впливу атмосферного забруднення.

Висновки

Встановлено, що вертикальний розподіл Pb по ґрунтових горизонтах характеризується відсутністю суттєвих відмінностей вмісту у гумусовому та елювіальному шарах. При цьому сумарні запаси у ґрунті екосистеми НПП «Голосіївський» були вищими у 1,2 рази та становили $72,1 \text{ кг} \times \text{га}^{-1}$, у Канівському природному заповіднику – $57,0 \text{ кг} \times \text{га}^{-1}$. Співставлення величин потоків Pb в умовах модельних екосистем грабових дібров вказує, що загальне надходження

металу до екосистеми суттєво не відрізняється та становить для НПП «Голосіївський» $65 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, для Канівського природного заповідника – $54 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$. Водночас частка Pb, що надходить з листяним опадом в умовах НПП «Голосіївський», становить 21%. В умовах Канівського природного заповідника на внесок листяного опаду припадає лише 7%. У результаті втрати Pb екосистемою НПП «Голосіївський» з вертикальним стоком ґрунтових вод за рік становили $35,2 \pm 4,3 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, що не покриває обсягів надходження металу у складі атмосферних опадів – $51 \pm 6 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$ та свідчить про незбалансованість його біогеохімічного циклу. В умовах Канівського природного заповідника потік вологого осадження Pb з атмосферними опадами становить $46,9 \pm 3,0 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$, що врівноважено величиною потоку вертикального ґрунтового стоку – $56,1 \pm 6,3 \text{ г} \times \text{га}^{-1} \times \text{рік}^{-1}$ та вказує на наявність балансу між надходженням та втратами металу екосистемою.

Подяки

Дослідження частково виконано в рамках стажування за програмою DAAD Programme Eastern Partnership на тему “Various approaches of phytoremediation of contaminated soils and water bodies by ferns and higher plants”. Автори висловлюють подяку професорці Ютті Паппенброк та дослідницькій групі лабораторії Метаболізму сірки та абіотичного стресу Інституту ботаніки Ганноверського університету імені Лейбніца за їхню підтримку та співпрацю під час проведення дослідження. Також автори висловлюють щире вдячність за можливість проведення досліджень адміністрації НПП «Голосіївський», а саме заступнику директора з науково-дослідної роботи к.б.н. Олені Прядко та начальнику відділу еколого-освітньої роботи Сергію Харі. Автори дякують за допомогу у щомісячному відборі зразків науковому співробітнику Канівського природного заповідника к.б.н. Василю Шевчику та начальнику відділу еколого-освітньої роботи PhD Миколі Борисенку.

Список використаної літератури

- Воробйов Є.О., Любченко В.М., Соломаха В.М., Орлов О.О. Класифікація грабових лісів України. Київ : Фітосоціоцентр, 2008. 252 с.
- Єгорова Т.М. Фоновий вміст важких металів та його екологічна інформативність у ґрунтах ландшафтів зони Українського Полісся. *Агрохімія та ґрунтознавство*. 2014. Т. 81. С. 65–72. [Електронний ресурс]. URL: http://agrosoil.yolasite.com/resources/2014_AIG_81_pp65-72.pdf (дата звернення 26.08.2024).
- Клос В.Р., Бірке М., Жовинський Е.Я., Акінфієв Г.О., Амашукелі Ю.А., Кламенс Р. Регіональні геохімічні дослідження ґрунтів України в рамках міжнародного проекту з геохімічного карту-

вання сільськогосподарських та пасовищних земель Європи (GEMAS). *Пошукова та екологічна геохімія*. 2012. Т. 1. С. 51–66.

Набиванець Б.І., Сухан В.В., Калабіна Л.В. Аналітична хімія природного середовища. К. : Либідь, 1996. 304 с.

Риженко Н.О. Наукові основи фітотоксикологічної оцінки небезпечності металів (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn) у екосистемах: автореф. дис. ... докт. біол. наук: 03.00.16. Київ, 2018. 40 с.

Самчук А.І., Кураєва І.В., Гродзинська Г.А., Вовк К.В., Войтюк Ю.Ю., Злобіна К.С., Стадник Т.В., Огар В.О., Небесний В.Б., Гончар Г.Ю. Важкі метали в об'єктах довкілля Київського мегаполісу Київ : Наш формат, 2019. 164 с.

Chen L., Liu C., Zou R., Yang M., Zhang Z. Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 208. P. 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.006>.

Connan O., Maro D., Hébert D., Roupsard P., Goujon R., Letellier B., Le Cavelier S. Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France. *Atmospheric Environment*. 2013. Vol. 67. P. 394–403. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.029>.

Conti M.E., Iacobucci M., Cecchetti G. A statistical approach applied to trace metal data from biomonitoring studies. *International Journal of Environment and Pollution*. 2005. Vol. 23. P. 29–41. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2005.006394>.

Diener A., Mudu P. How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective - with implications for urban planning. *Science of The Total Environment*. 2021. Vol. 796. 148605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605>.

Guidance for comparing background and chemical concentrations in soil for CERCLA sites. EPA 540-R-01-003 OSWER 9285.7-41. Washington: Office of Emergency and Remedial Response. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/background.pdf> (дата звернення 26.08.2024).

Halasz G.E., Árgyelan J. T., Horvath M. K. Phytoremediation of potential toxic elements by native tree species in mined-spoiled soils in Mátraszentimre, Hungary. *Journal of Environmental Science and Management*. 2022. Vol. 25. P. 51–62. https://doi.org/10.47125/jesam/2022_2/06.

Hůnová I., Kurfürst P., Schreiberová M., Vlasáková L., Škáčhová H. Atmospheric Deposition of Lead and Cadmium in a Central European Country over the Last Three Decades. *Atmosphere*, 2023. Vol. 14. 19. <https://doi.org/10.3390/atmos14010019>.

Kaszala R., Bárányi-Kevei I., Polyák-Földi K. Heavy metal content of the vegetation on karstic soils. *Acta Climatologica et Chorologica*. 2003. Vol. 36. P. 57–62. https://doi.org/10.1007/0-387-23079-3_13.

Kim N.D., Fergusson J.E. Seasonal variations in the concentrations of cadmium, copper, lead and zinc in leaves of the horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.). *Environmental Pollution*. 1994. Vol. 86. P. 89–97. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)90010-8).

Laskowski R., Berg B. Dynamics of some mineral nutrients and heavy metals in decomposing forest litter. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 1993. Vol. 8. P. 446–456. <https://doi.org/10.1080/02827589309382791>.

Laskowski R., Niklińska M., Maryański M. The Dynamics of Chemical Elements in Forest Litter. *Ecology*. 1995. Vol. 76. P. 1393–1406. <https://doi.org/10.2307/1938143>.

Lawson N.M., Mason R.P. Concentration of mercury, methylmercury, cadmium, lead, arsenic, and selenium in the rain and stream water of two contrasting watersheds in western Maryland. *Water Research*. 2001. Vol. 35. P. 4039–4052. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00140-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00140-3).

Makowski V., Julich S., Feger K., Breuer L., Julich D. Leaching of dissolved and particulate phosphorus via preferential flow pathways in a forest soil: An approach using zero-tension lysimeters. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 2020. Vol. 183. P. 238–247. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900216>.

Maksimtsev S., Dudarets S., Yukhnovskiy V. Accumulation of heavy metals in soil and litter of roadside plantations in Western Polissia of Ukraine. *Folia Forestalia Polonica, Series A*. 2021. Vol. 63. P. 232–242. <https://doi.org/10.2478/ffp-2021-0024>.

Montemagno A., Hissler C., Bense V., Teuling A. J., Ziebel J., Pfister L. Dynamics of rare earth elements and associated major and trace elements during Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) litter degradation. *Biogeosciences*. 2022. Vol. 19. P. 3111–3129. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3111-2022>.

- Percy K.E., Ferretti M. Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts. *Environmental Pollution*. 2004. Vol. 130. P. 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.10.034>.
- Piczak K., Leśniewicz A., Zyrnicki W. Metal concentrations in deciduous tree leaves from urban areas in Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2003. Vol. 86. P. 273–287. <https://doi.org/10.1023/a:1024076504099>.
- Scheid S., Gunthardt-Goerg M. S., Schulin R., Nowack B. Accumulation and solubility of metals during leaf litter decomposition in non-polluted and polluted soil. *European Journal of Soil Science*. 2009. Vol. 60. P. 613–621. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01153.x>.
- Schmidt J.P., Henry L. Water and Bromide Recovery in Wick and Pan Lysimeters under Conventional and Zero Tillage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2008. Vol. 39. P. 108–123. <https://doi.org/10.1080/00103620701759053>.
- Schreck E., Foucault Y., Sarret G., Sobanska S., Cécillon L., Castrec-Rouelle M., Uzu G., Dumat C. Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: Mechanisms involved for lead. *Science of the Total Environment*. 2012. Vol. 427–428. P. 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.051>.
- Shahid M., Dumat C., Khalid S., Schreck E., Xiong T., Khan N. N. Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*. 2017. Vol. 325. P. 36–58. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063>.
- Tisserand R., Van der Ent A., Nkrumah P., Didier S., Sumail S., Morel J.-L., Echevarria G. Nickel stocks and fluxes in a tropical agromining 'metal crop' farming system in Sabah (Malaysia). *Science of The Total Environment*. 2024. Vol. 919. P. 170691. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170691>.
- Turcios A., Papenbrock J., Tränkner M. Potassium, an important element to improve water use efficiency and growth parameters in quinoa (*Chenopodium quinoa*) under saline conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 2021. Vol. 207. P. 618–630. <https://doi.org/10.1111/jac.12477>.
- Tyler G., Olsson T. The importance of atmospheric deposition, charge and atomic mass to the dynamics of minor and rare elements in developing, ageing, and wilted leaves of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Chemosphere*. 2006. Vol. 65. P. 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.02.051>.
- Virzo De Santo A., Fierro A., Berg B., Rutigliano F. A. De Marco A. Heavy metals and litter decomposition in coniferous forests. *Developments in Soil Science*. 2002. Vol. 28, P. 63–78. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(02\)80044-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(02)80044-7).

References

- Vorobyov, E.O., Lyubchenko, V.M., Solomakha, V.M., & Orlov, O.O. (2008). *Klasyfikatsiya hrabovoykh lisiv Ukrayiny* [Classification of hornbeam forests of Ukraine]. Kyiv : Phytosocial Center [in Ukrainian].
- Yehorova, T.M. (2014). *Fonovyy vmist vazhkykh metaliv ta yoho ekolohichna informatyvnyshchyna u hruntakh landshaftiv zony Ukrayins'koho Polissya*. [The background content of heavy metals and its ecological informativeness in the soils of the landscapes of the Ukrainian Polissia]. *Ahrokhimiya ta hruntoznavstvo* [Agrochemistry and soil science], 81, 65–72. [Electronic resource] URL: http://agrosoil.yolasite.com/resources/2014_AIG_81_pp65-72.pdf (access date 28.08.2024) [in Ukrainian].
- Klos, V.R., Birke, M., Zhovyns'kyy, E.Ya., Akinfiyev, H.O., Amashukeli, Yu.A., & Klamens, R. (2012). *Rehional'ni heokhimichni doslidzhennya gruntiv Ukrayiny v ramkakh mizhnarodnoho proektu z heokhimichnoho kartuvannya sil's'kohospodars'kykh ta pasovyshchnykh zemel' Yevropy (GEMAS)* [Regional geochemical studies of Ukrainian soils within the framework of the international project on geochemical mapping of agricultural and pasture lands of Europe (GEMAS)]. *Poshukova ta ekolohichna heokhimiya* [Exploration and Environmental Geochemistry], 1, 51–66 [in Ukrainian].
- Nabivanets, B.I., Sukhan, V.V., & Kalabina, L.V. (1996). *Analychna khimiya pryrodnoho seredovyshcha* [Analytical chemistry of the natural environment]. Kyiv : Lybid [in Ukrainian].
- Ryzhenko, N. (2018). *Naukovi osnovy fitotoksykologichnoyi otsinky nebezpechnosti metaliv (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn) u ekosystemakh* [Scientific principles of phytotoxicological assessment of metals hazard (Cd, Pb, Co, Cu, Ni, Zn) in ecosystems]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Kyiv. 40 p. [in Ukrainian].
- Samchuk, A.I., Kuraeva, I.V., Grodzinska, G.A., Vovk, K.V., Voytyuk, Y.Yu., Zlobina, K.S., Stadnyk, T.V., Ogar, V.O., Nebesnyi, V.B., & Gonchar, G.Yu. (2019). *Vazhki metaly v ob'yektakh*

dovkillya Kyivys`koho mehapolisu [Heavy metals in the objects of the environment of the Kyiv metropolis]. Kyiv : Nash format [in Ukrainian].

Chen, L., Liu, C., Zou, R., Yang, M., & Zhang Z. (2016). Experimental examination of effectiveness of vegetation as bio-filter of particulate matters in the urban environment. *Environmental Pollution*, 208, 198–208. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.09.006> [in English].

Connan, O., Maro, D., Hébert, D., Roupsard, P., Goujon, R., Letellier, B., & Le Cavalier, S. (2013). Wet and dry deposition of particles associated metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Hg) in a rural wetland site, Marais Vernier, France. *Atmospheric Environment*, 67, 394–403. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.029> [in English].

Conti, M.E., Iacobucci, M., & Cecchetti, G. (2005). A statistical approach applied to trace metal data from biomonitoring studies. *International Journal of Environment and Pollution*, 23 (1), 29–41. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2005.006394> [in English].

Diener, A., & Mudu, P. (2021). How can vegetation protect us from air pollution? A critical review on green spaces' mitigation abilities for air-borne particles from a public health perspective – with implications for urban planning. *Science of The Total Environment*, 796, 148605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148605> [in English].

Guidance for comparing background and chemical concentrations in soil for CERCLA sites (2002). EPA 540-R-01-003 OSWER 9285.7–41. Washington: Office of Emergency and Remedial Response. [Electronic resource] URL: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-11/documents/background.pdf> (access date 28.08.2024) [in English].

Halasz, G.E., Árgyelan, J.T., & Horvath, M.K. (2022). Phytoremediation of potential toxic elements by native tree species in mined-spoiled soils in Mátraszentimre, Hungary. *Journal of Environmental Science and Management*, 25 (2), 51–62. https://doi.org/10.47125/jesam/2022_2/06 [in English].

Hůnová, I., Kurfürst, P., Schreiberová, M., Vlasáková, L., & Škáchová, H. (2023). Atmospheric Deposition of Lead and Cadmium in a Central European Country over the Last Three Decades. *Atmosphere*, 14 (1), 19. <https://doi.org/10.3390/atmos14010019> [in English].

Kaszala, R., Bárány-Kevei, I., & Polyák-Földi, K. (2003). Heavy metal content of the vegetation on karstic soils. *Acta Climatologica et Chorologica*, 36 (37), 57–62. https://doi.org/10.1007/0-387-23079-3_13 [in English].

Kim, N.D., & Fergusson, J.E. (1994). Seasonal variations in the concentrations of cadmium, copper, lead and zinc in leaves of the horse chestnut (*Aesculus hippocastanum* L.). *Environmental Pollution*, 86 (1), 89–97. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(94\)90010-8](https://doi.org/10.1016/0269-7491(94)90010-8) [in English].

Laskowski, R., & Berg, B. (1993). Dynamics of Some Mineral Nutrients and Heavy Metals in Decomposing Forest Litter. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 8, 446–456. <https://doi.org/10.1080/02827589309382791> [in English].

Laskowski, R., Niklińska, M., & Maryański, M. (1995). The Dynamics of Chemical Elements in Forest Litter. *Ecology*, 76 (5), 1393–1406. <https://doi.org/10.2307/1938143> [in English].

Lawson, N.M., & Mason, R.P. (2001). Concentration of mercury, methylmercury, cadmium, lead, arsenic, and selenium in the rain and stream water of two contrasting watersheds in western Maryland. *Water Research*, 35, 4039–4052. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(01\)00140-3](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(01)00140-3) [in English].

Makowski, V., Julich, S., Feger, K., Breuer, L., & Julich, D. (2020). Leaching of dissolved and particulate phosphorus via preferential flow pathways in a forest soil: An approach using zero-tension lysimeters. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183, 238–247. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900216> [in English].

Maksimtsev, S., Dudarets, S., & Yukhnovskiy, V. (2021). Accumulation of heavy metals in soil and litter of roadside plantations in Western Polissia of Ukraine. *Folia Forestalia Polonica, Series A*, 63 (3), 232–242. <https://doi.org/10.2478/ffp-2021-0024> [in English].

Montemagno, A., Hissler, C., Bense, V., Teuling, A.J., Ziebel, J., & Pfister, L. (2022). Dynamics of rare earth elements and associated major and trace elements during Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) litter degradation. *Biogeosciences*, 19, 3111–3129. <https://doi.org/10.5194/bg-19-3111-2022> [in English].

Percy, K.E., & Ferretti, M. (2004). Air pollution and forest health: toward new monitoring concepts. *Environmental Pollution*, 130 (1), 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2003.10.034> [in English].

Piczak, K., Leśniewicz, A., & Zyrnicki, W. (2003). Metal concentrations in deciduous tree leaves from urban areas in Poland. *Environmental Monitoring and Assessment*, 86 (3), 273–287. <https://doi.org/10.1023/a:1024076504099> [in English].

Scheid, S., Gunthardt-Goerg, M.S., Schulin, R., & Nowack, B. (2009). Accumulation and solubility of metals during leaf litter decomposition in non-polluted and polluted soil. *European Journal of Soil Science*, 60, 613–621. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01153.x> [in English].

Schmidt, J.P., & Henry, L. (2008). Water and Bromide Recovery in Wick and Pan Lysimeters under Conventional and Zero Tillage. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 39 (1–2), 108–123. <https://doi.org/10.1080/00103620701759053> [in English].

Schreck, E., Foucault, Y., Sarret, G., Sobanska, S., Cécillon, L., Castrec-Rouelle, M., Uzu, G., & Dumat, C. (2012). Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: Mechanisms involved for lead, *Science of the Total Environment*, 427–428, 253–262. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.051> [in English].

Shahid, M., Dumat, C., Khalid, S., Schreck, E., Xiong, T., & Khan, N.N. (2017). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxification in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, 325, 36–58. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.11.063> [in English].

Tisserand, R., Van der Ent, A., Nkrumah, P., Didier, S., Sumail, S., Morel, J.-L., & Echevarria, G. (2024). Nickel stocks and fluxes in a tropical agromining ‘metal crop’ farming system in Sabah (Malaysia). *Science of The Total Environment*, 919, 170691. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.170691> [in English].

Turcios, A., Papenbrock, J., & Tränkner, M. (2021). Potassium, an important element to improve water use efficiency and growth parameters in quinoa (*Chenopodium quinoa*) under saline conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 207 (4), 618–630. <https://doi.org/10.1111/jac.12477> [in English].

Tyler, G., & Olsson, T. (2006). The importance of atmospheric deposition, charge and atomic mass to the dynamics of minor and rare elements in developing, ageing, and wilted leaves of beech (*Fagus sylvatica* L.). *Chemosphere*, 65 (2), 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.02.051> [in English].

Virzo De Santo, A., Fierro, A., Berg, B., Rutigliano, F.A., & De Marco, A. (2002). Heavy metals and litter decomposition in coniferous forests. *Developments in Soil Science*, 28 (A), 63–78. [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(02\)80044-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(02)80044-7) [in English].

Отримано: 19.09.2024

Прийнято: 18.11.2024