

УДК 504.064

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.2-41.1>

БІОАКУМУЛЯЦІЯ (CD, PB, HG) РОСЛИНАМИ НА ТЕРИТОРІЇ КРИВОРІЗЬКОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО БАСЕЙНУ (НА ПРИКЛАДІ КАР'ЄРУ «ПІВДЕННИЙ»)

Бондар О.І., Риженко Н.О., Похил Ю.Г.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління
вул. Митрополита Василя Липківського 35, корпус 2, 03035, м. Київ
dei2005@ukr.net; ukr.net; ulia.pohil@gmail.com

Висвітлені результати досліджень щодо біоаккумуляції металів (Cd, Pb, Hg) рослинами на території Криворізького залізорудного басейну. Проби рослинного матеріалу та ґрунту (0–20 см) були відібрані у польових умовах у липні 2021 року. Лабораторні дослідження на вміст металів атомно-абсорбційним методом виконувались у Дніпровській філії державної установи «Інститут охорони ґрунтів України» (ДУ «Держґрунтохорона»). Виявлено розподіл металів у ґрунті (0–20 см) та рослинах (*Juglans regia* L., *Polygonum aviculare* L., *Taraxacum officinale* L., *Eryngium planum* L., *Plantago major* L., *Achillea millefolium* L.) біля кар'єру «Південний» на території Криворізького залізорудного басейну. Встановлено, що вміст кадмію, свинцю та ртуті не перевищував встановлених нормативів гранично допустимих концентрацій для валового вмісту у ґрунті. Найбільшими значеннями валового вмісту у ґрунті характеризувався свинець. З'ясовано, що більшими значеннями вмісту у фітомасі всіх досліджуваних рослин відрізнявся свинець у порівнянні із кадмієм та ртуттю. Розраховано коефіцієнти біоаккумуляції у системі «ґрунт-рослина» металів Cd, Pb, Hg на досліджуваній території та проведено порівняльну оцінку біодоступності металів різними видами рослин. Визначено низку рослин за коефіцієнтом біоаккумуляції: *Juglans regia* L. > *Polygonum aviculare* L. > *Taraxacum officinale* L. > *Eryngium planum* L. > *Plantago major* L. > *Achillea millefolium* L. Як наслідок, висновки дослідження можуть використовуватися для уточнення екологічного моніторингу досліджуваної території, а також у процедурах оцінки впливу на довкілля та стратегічної екологічної оцінки з метою поліпшення стану компонентів довкілля на території Криворізького залізорудного басейну. **Ключові слова:** токсичні метали, біоаккумуляція, фітомаса, ГДК, навколишнє середовище, система «ґрунт-рослина».

Bioaccumulation (Cd, Pb, Hg) by plants in the Kryvyi Rih iron ore basin (on the example of the «Southern» quarry). Bondar O., Ryzhenko N., Pokhyl Yu.

The article highlights the results of the study of bioaccumulation of metals (Cd, Pb, Hg) by plants in the Kryvyi Rih iron ore basin. Samples of plant material and soil (0–20 cm) were taken in the field in July 2021. Laboratory tests for the content of metals by the atomic absorption method were worked out at the Dnipro branch of the State Institution «Institute of Soil Protection of Ukraine». Distribution of metals in soil (0–20 cm) and plants (*Juglans regia* L., *Polygonum aviculare* L., *Taraxacum officinale* L., *Eryngium planum* L., *Plantago major* L., *Achillea millefolium* L.) near the quarry «Southern» was revealed on the territory of the Kryvyi Rih iron ore basin. The total content of cadmium, lead and mercury did not exceed the established standards of maximum permissible concentrations. Lead was characterized by the highest values of total content in the soil. The lead had highest concentration in phytomass in all studied plants in comparison with cadmium and mercury. The coefficients of bioaccumulation in the soil-plant system of metals Cd, Pb, Hg in the study area were calculated. The comparative assessment of the bioavailability of metals by different plant species was presented. A number of plants have been identified by bioaccumulation coefficient: *Juglans regia* L. > *Polygonum aviculare* L. > *Taraxacum officinale* L. > *Eryngium planum* L. > *Plantago major* L. > *Achillea millefolium* L. The results of the work can be used to improve monitoring in the procedures of environmental impact assessment and strategic environmental assessment for improve the environment in the Kryvyi Rih iron ore basin. **Key words:** toxic metals, bioaccumulation, phytomass, MPC, environment, soil-plant system.

Постановка проблеми. Токсичні метали, зважаючи на їхню стійкість у навколишньому середовищі та біоаккумуляційну природу, є неабиякими забруднювачами навколишнього середовища. Їхні природні джерела – вивітрювання металовмісних порід та виверження вулканів, а антропогенні – гірничодобувна промисловість та сільськогосподарська діяльність. Гірничодобувна та промислова переробка для видобутку корисних копалин, подальше застосування їх на шляху економічного розвитку країни призвели до значного накопичення таких елементів у навколишньому середовищі, що спричинило пору-

шення їхніх біогеохімічних циклів. Гірничодобувні території Криворіжжя традиційно відносяться до найбільш проблемних в екологічному вимірі. Ґрунти та рослини в регіоні упродовж тривалого часу зазнають інтенсивного техногенного впливу, наслідком якого є широкомасштабне забруднення екосистем. У Криворізькому басейні розташовані вісім з одинадцяти підприємств України з видобутку та переробки залізорудної сировини. Одним із найдавніших і найбільших кар'єрів у регіоні є «Південний». Отже, виявлення закономірностей біодоступності металів в умовах забруднення вирішує прикладні наукові

задачі, сприятиме прогнозуванню наслідків впливу для біоти.

Актуальність дослідження. У Законі України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» наголошено, що першопричинами екологічних проблем України є: переважання ресурсо- та енергоємних галузей у структурі економіки із здебільшого негативним впливом на довкілля. Забруднення хімічними речовинами під час застосування промислових технологій та видобування залізної руди є негативним втручанням у функціонування біогеохімічних циклів. Екологічна сутність хімічного забруднення проявляється у порушенні дії законів, принципів, правил існування та функціонування біологічних систем різного рівня, починаючи від організменого і закінчуючи біосферним. Ґрунтова система слугує своєрідним буфером забруднення, утім міграція у ґрунтового профілі та біоаккумуляція є основними шляхами транслокації металів у екосистемі. Вивчення біоаккумуляції досить важливе, оскільки відповідний показник може впливати на продуктивність фітокомпоненту. Найбільш небезпечні для навколишнього середовища метали та металоїди вміщують Cd, Pb та Hg. Тому досить важливо визначати ступінь забруднення та контролювати концентрації таких полутантів у різних сегментах екосистеми та у резидентній біоті. Це дозволить вжити необхідних заходів щодо мінімізації впливу таких елементів і на здоров'я людини, і на біоту.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. У Європі були проведені масштабні дослідження щодо концентрації металів у ґрунтах [1] за участі таких організацій, як EuroGeo Survey, Geological Survey of Finland (GTK) та Форуму директорів європейських геологічних служб (FOREGS). На жаль, Україна не була охоплена вище зазначеним проєктом. Звіти європейських країн засвідчують, що токсичні метали та мінеральна олія – найчастіші забруднювачі ґрунтів [2].

За даними Продовольчої та сільськогосподарської організації (ФАО), а також та Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) максимальні рівні вмісту металів у ґрунті становлять для кадмію від 0,8 до 20 мг/кг, свинцю – від 85 до 600 мг/кг, ртуті – 2,2 мг/кг [3–4]. Європейські та вітчизняні гранично допустимі концентрації металів наведені у таблиці 1 [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За висновками Самохвалової зі співавторами (2019), особливості функціонування ґрунту, прояви його властивостей пов'язані з перерозподілом сполук хімічних елементів [6]. Для об'єктивної оцінки мікроелементного статусу ґрунтів необхідними є стають дані як щодо валового мікроелементного складу ґрунтів, так і вмісту рухомих форм металів. Валовий вміст елемента у ґрунті не завжди відобра-

жає його справжню міграційну здатність, тому що у ґрунті водночас наявні різні форми елементів, які відрізняються властивостями й доступністю для рослин. Отже, для більш повної оцінки зв'язку рухомості металів та їх міграції необхідно використовувати показники вмісту рухомих форм металу у ґрунті.

Таблиця 1

Максимальні рівні вмісту металів у ґрунті в Європі

Метал	Стандарт (МРС), мг/кг Європа	ГДК, мг/кг Україна
Cd	1,6	1,5
Pb	140	32
Hg	Неорганічний меркурій – 2,2	2,1
	Метилорганічний меркурій – 0,67	

Вважається, що Pb є одним з менш мобільних металів, він має сильну спорідненість із сіркою, тому часто зв'язується із сульфідами, оскільки галеніт (PbS) є найпоширенішим рудним мінералом. Pb має два стабільні ступені окислення: Pb (II) та Pb (IV). Середня концентрація в незабруднених ґрунтах, за різними оцінками, у світі знаходиться на рівні 40 мг/кг [7]. Незалежно від типу ґрунту Pb накопичується переважно у його верхній частині. Кількість Pb, що затримується оксигідроксидами заліза, досить незначна у всіх типах ґрунтів. Концентрація розчинних форм Pb значно вища в основних ґрунтах, ніж у кислих. Cd зустрічається як двовалентний іон Cd(II) та знаходиться безпосередньо нижче Zn в періодичній системі і має хімічну схожість з цинком, важливим мікроелементом для рослин, замінюючи його, що й призводить до порушення метаболічних процесів [8]. Cd має один з найвищих мобілізаційних потенціалів у навколишньому середовищі серед інших металів. Конкуренція та індуквана лігандом десорбція є причиною швидкого вивільнення Cd із ґрунту в ґрунтові води [9]. На поведінку Hg впливають фізико-хімічні властивості ґрунту, зокрема розмір фракцій, оскільки іони металу зв'язуються із дрібними частинками інтенсивніше. Гумінова кислота впливає на транспорт і трансформацію Hg у системах «ґрунт-рослина», особливо для ґрунтів з низьким вмістом глинистої фракції. Гумінова кислота зменшує кількість доступного меркурію у ґрунті та запобігає його біодоступності й вилугуванню з ґрунту [10]. Чорноземи звичайні малогумусні займають 67,5 % площі Криворізького природно-господарського району, характерна властивість яких – нагромадження обмінних лугів і біогенних зольних компонентів у верхній частині ґрунтового профілю. На півночі переважають важко-суглинисті, а на півдні – легко-суглинисті малопотужні різновиди з вмістом гумусу в орному шарі в середньому 3,4–5,2 % (від 2,0 до 6,0 %). З огляду на це, зв'язування металів органічною речовиною ґрунту, особ-

ливо меркурію, впливає як на валовий вміст, так і на концентрацію рухомих форм.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проблемою дослідження полягає в оцінці забруднення токсичними металами (Cd, Pb, Hg) системи «грунт-рослина» на території Криворізького залізничного басейну з метою визначення закономірностей біоаккумуляції та визначення пріоритетних напрямів контролю для зменшення антропогенного навантаження на екосистеми.

Новизна. Автори вперше визначили розподіл металів у ґрунті (0–20 см) та рослинах (*Juglans regia* L., *Polygonum aviculare* L., *Taraxacum officinale* L., *Eryngium planum* L., *Plantago major* L., *Achillea millefolium* L.) неподалік кар'єру «Південний», що знаходиться на території Криворізького залізничного басейну; розраховані коефіцієнти біоаккумуляції (КБ) у системі «грунт-рослина» металів Cd, Pb, Hg на досліджуваній території та проведено порівняльну оцінку біодоступності металів різними видами рослин.

Методологічне або загальнонаукове значення. Аналітичні визначення вмісту Hg, Cd, Pb у зразках ґрунту та рослин здійснювалося в атестованій ДП «Дніпропетровський обласний виробничо-технічний центр стандартизації і метрології «Дніпрооблагростандарт» лабораторії Дніпропетровської філії державної установи «Інститут охорони ґрунтів України» (ДУ «Держґрунтохорона») у 2021 році.

Коефіцієнт біоаккумуляції (КБ) у системі «грунт-рослина» розраховували так [11–13]:

$$КБ = \frac{C_p}{C_r}, \quad [11]$$

де C_p – концентрація металу у рослині, мг/кг сухої речовини,

C_r – концентрація металу у ґрунті, мг/кг.

Статистичний аналіз даних проводився згідно загально прийнятих методик [14–15]. Відбір проб (зразки ґрунту (0–20 см)) та аналітичне визначення металів у ґрунті та фітомасі відбирали за ДСТУ 4287:2004 [16]. Як тест-об'єкти використовувалися такі види рослин: (*Juglans regia* L., *Achillea millefolium* L., *Taraxacum officinale* L., *Plantago major* L., *Eryngium planum* L., *Polygonum aviculare* L.) (табл. 2).

Зважаючи на те, що найбільший вміст металів (за даними з наукових джерел) у надземній фітомасі трав'янистих дикорослих рослин накопичується у фазі цвітіння та на початку плодоношення, більшість досліджуваних рослин відбирали саме у вище згаданих фазах. Екстракція валових форм елементів з ґрунту здійснювалася відповідно до інструкції «Методические указания по определению тяжёлых металлов в почвах сельскохозяйственных и продуктивных растений» (1980). Визначення металів у ґрунті

проводилося методом атомно-адсорбційної спектrophотометрії за ГОСТ 30178-96 [17].

Таблиця 2

Перелік відібраних зразків у польових умовах

РОСЛИНИ	КООРДИНАТИ
Точка 1. м. Кривий Ріг, вул. Ентузіастів 189	
Горіх волосський (<i>Juglans regia</i> L.)	47°55'30,4" 33°21'35,0" H = 59 м
Деревій звичайний (<i>Achillea millefolium</i> L.)	47°55'30,4" 33°21'35,0" H = 59 м
Точка 2. м. Кривий Ріг, перехрестя вул. Миколи Ходича та просп. Карла Маркса	
Деревій звичайний (<i>Achillea millefolium</i> L.)	47°55'24,2" 33°21'17,2" H = 57 м
Точка 3. м. Кривий Ріг, вул. Псковська 2а	
Кульбаба лікарська (<i>Taraxacum officinale</i> L.)	47°56'04,2" 33°21'20,9" H = 77 м
Подорожник великий (<i>Plantago major</i> L.)	47°56'04,2" 33°21'20,9" H = 77 м
Точка 4. м. Кривий Ріг, Світлогірська, геологічна пам'ятка Сланцеві скелі	
(Миколайчики сині <i>Eryngium planum</i> L.)	47°56'29,3" 33°23'20,6" H = 85 м
Точка 5. м. Кривий Ріг, 21.07.21 р. пішохідний міст, вул. Дідро 12	
(Спориш звичайний <i>Polygonum aviculare</i> L.)	47°56'22,1" 33°23'59,8" H = 88 м

За даними European Environmental Agency (2021) [18], близько 50 % від загального антропогенного навантаження на природне середовище припадає на забруднення, зокрема, і токсичними металами. У 2012 році до Орхуського протоколу 1998 року було внесено зміни та запроваджено суворіший контроль за трьома особливо шкідливими субстанціями: Cd, Hg і Pb, що зобов'язує сторони зменшувати свої викиди металів з допустимих рівнів 1990 року (або альтернативного року – з 1985 по 1995 включно) [19]. Відповідно до зобов'язань ЄС згідно з Конвенцією про повітря, відбулось скорочення викидів металів у Європі з рівня 1990 року. У період з 2005 по 2019 рік викиди продовжували знижуватися, при цьому викиди свинцю зменшилися на 44 %, ртуті на 45 % і викиди кадмію на 33 % у країнах-членах ЄС-27. У 2019 році Німеччина, Італія та Польща зробили найвагоміший внесок у програми заходів у ЄС, спрямованих на зменшення викидів металів. Не зважаючи на те, що European Environmental Agency (2021) [20] в цілому демонструє від'ємні тренди емісій металів у Європі, проблема забруднення металами в Україні залишається нерозв'язаною (рис. 1).

Скорочення викидів металів є фокусом дій міжнародного рівня та ЄС. Адже ЄС є учасником Конвенції про трансграничне забруднення повітря на значні відстані (Конвенція LRTAP), загальноєвропейської рамки для зменшення забруднення пові-

тря, у тому числі метали (відповідно до Орхуського протоколу). Викиди ртуті у Європі також контролюються Мінаматською конвенцією Програми ООН з навколишнього середовища, яку Україна й досі не ратифікувала. Отже важливо досліджувати тему впливу металу на здоров'я людей, особливо його більш токсичної та біоаккумулятивної форми (метилртуть руйнівна). За останні десятиліття кількість наукових досліджень щодо фатального впливу ртуті та її сполук на довкілля значно збільшилася. В результаті діяльності людини у минулому і нині загальна концентрація ртуті в атмосфері збільшилася приблизно на 450 % порівняно з природними рівнями (ЮНЕП) [21].

Так, розвиток металургійної діяльності призвів до історичного накопичення металів у ґрунті. Концентрація металів у ґрунті значно змінюється залежно від типу ґрунту та географічного регіону. Це засвідчує, що материнська порода, кліматичні умови та діяльність людини мають переважний вплив на хімічні форми (видоутворення) та мобільність металів у ґрунті.

Викладення основного матеріалу. Найменшим значенням вмісту свинцю та ртуті характеризується локація на вулиці Ентузістів, найбільшим вмістом свинцю – пішохідний міст по вулиці Дідро, що може бути пов'язано із перенесенням цього металу за домінуючим для Кривого Рогу напрямом вітру у північно східний бік [22] (рис. 2).

Вміст кадмію достовірно не відрізнявся на всіх досліджуваних ділянках, крім третьої точки (вул. Псковська 2а) (рис. 2). На третій досліджуваній ділянці вміст кадмію становив 0,46 мг/кг і був достовірно найбільшим з усіх досліджуваних ділянок. Вміст ртуті був достовірно більшим у точці 2 на перехресті вулиці Миколи Ходича та проспекту Карла Маркса, а достовірно меншим – у першій точці (вул. Ентузістів), хоча саме точка один знаходиться у найближчому розташуванні до кар'єру Південний.

Органічні фракції ґрунту відіграють надзвичайно важливу роль, оскільки вони можуть затримувати як накопичення, так і перенесення металів, а також їх переміщення в ґрунт. Токсичність металів у ґрунті може бути підвищена або зменшена

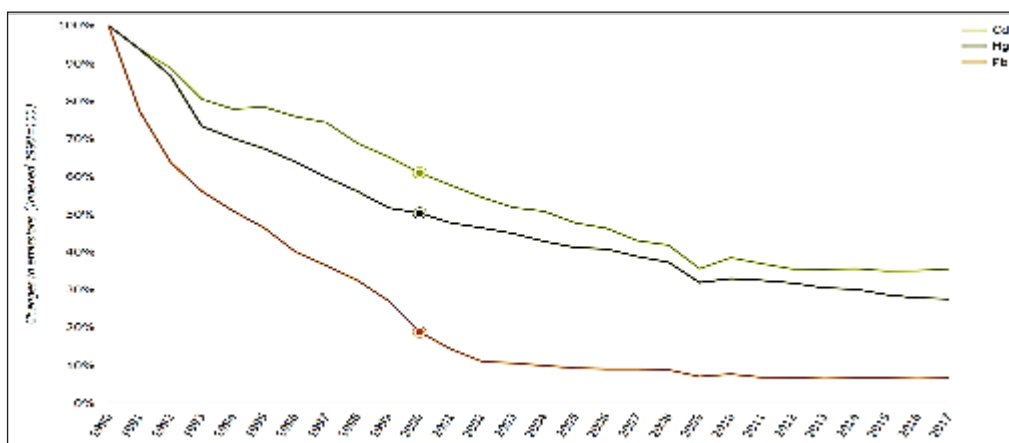


Рис. 1. Тенденції емісії металів у Європі

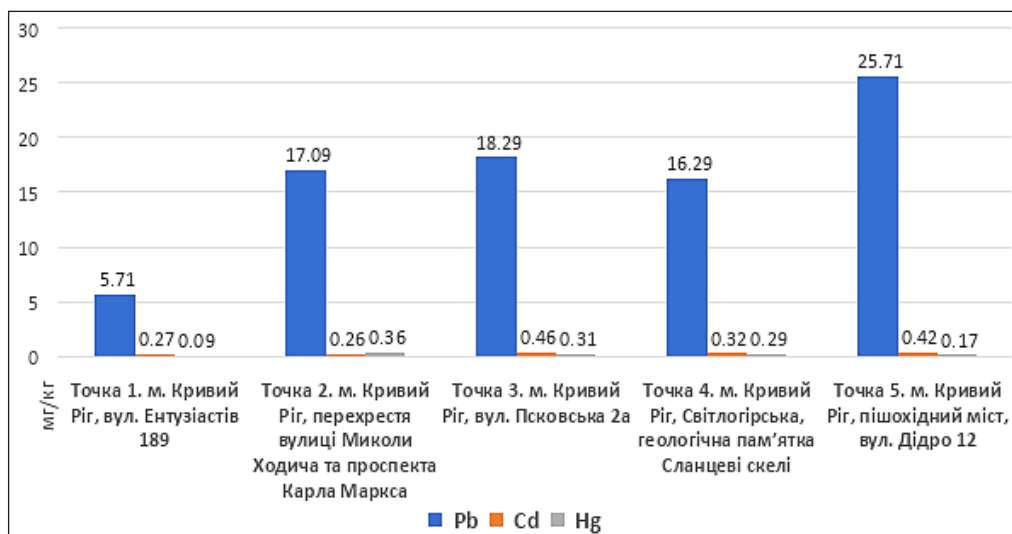


Рис. 2. Порівняльна оцінка вмісту металів у ґрунті

за рахунок органічної фракції ґрунту. P_n ґрунту безпосередньо впливає на доступність металів, оскільки кислотність ґрунту визначає розчинність елемента та його здатність переміщатися в ґрунтового розчині. Інтенсивність поглинання металів рослиною є важливим показником як токсичності

поллютанта, так і характеристики видової чутливості рослин. Вміст Cd, Pb, Hg у надземній фітомасі рослин (*Juglans regia* L., *Achillea millefolium* L., *Taraxacum officinale* L., *Plantago major* L., *Eryngium planum* L., *Polygonum aviculare* L.) наведений у таблиці 3.

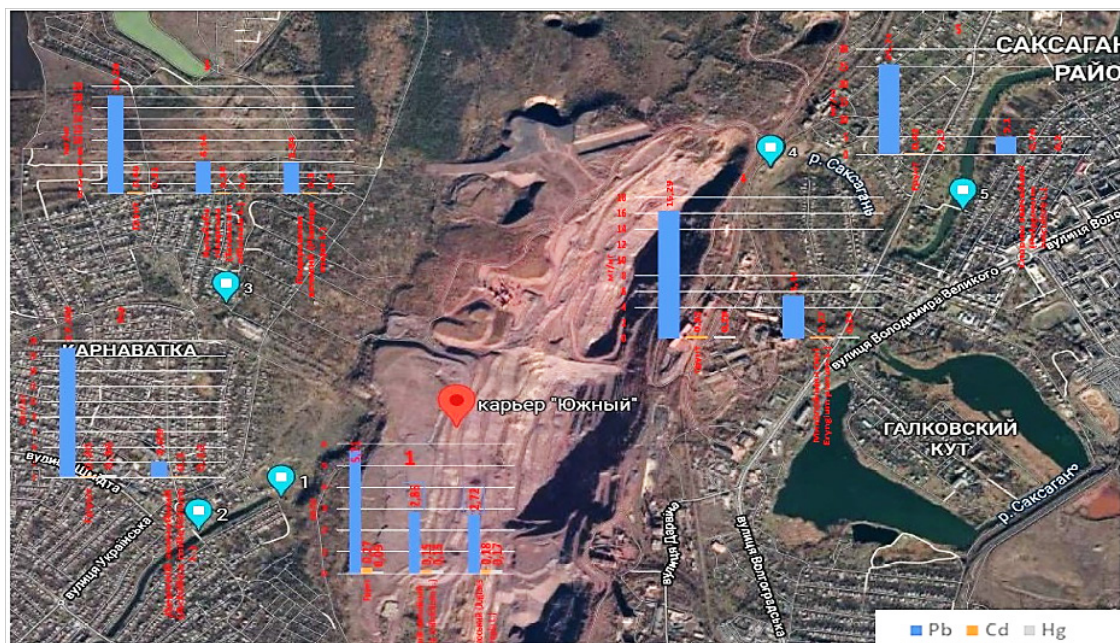


Рис. 3. Картосхема вмісту металів у системі «ґрунт-рослина»

Таблиця 3

Вміст Cd, Pb, Hg у надземній фітомасі рослин

Рослина	Координати	Результати випробувань на м. с. р., мг/кг		
		Pb	Cd	Hg
Точка 1. м. Кривий Ріг, вул. Ентузіастів 189				
Горіх волоський (Juglans regia L.)	47°55'30,4" 33°21'35,0" Н = 59 м	2,86±0,1	0,18±0,02	0,17±0,01
Деревій звичайний (Achillea millefolium L.)	47°55'30,4" 33°21'35,0" Н = 59 м	2,72±0,1	0,15±0,02	0,15±0,02
Точка 2. м. Кривий Ріг, перехрестя вулиці Миколи Ходича та проспекта Карла Маркса				
Деревій звичайний (Achillea millefolium L.)	47°55'24,2" 33°21'17,2" Н = 57 м	2,09±0,08	0,10±0,001	0,12±0,02
Точка 3. м. Кривий Ріг, вул. Псковська 2а				
Кульбаба лікарська (Taraxacum officinale L.)	47°56'04,2" 33°21'20,9" Н = 77 м	6,16±0,5	0,34±0,13	0,20±0,08
Подорожник великий (Plantago major L.)	47°56'04,2" 33°21'20,9" Н = 77 м	5,84±0,5	0,30±0,07	0,20±0,05
Точка 4. м. Кривий Ріг, Світлогірська, геологічна пам'ятка Сланцеві скелі				
Миколайчики сині Eryngium planum L.)	47°56'29,3" 33°23'20,6" Н = 85 м	5,44±0,6	0,27±0,03	0,19±0,02
Точка 5. м. Кривий Ріг, 21.07.21 р. пішохідний міст, вул. Дідро 12				
Спориш звичайний Polygonum aviculare L.)	47°56'22,1" 33°23'59,8" Н = 88 м	5,10±0,54	0,26±0,02	0,20±0,03
Стандартне відхилення (σ)		1,69	0,87	0,03
Дисперсія (S2)		2,87	0,008	0,001
F		Fпракт. (358,8) > Fтеор. (6,4)		
		Fпракт. (0,008) < Fтеор. (6,4)		
ГДК (овочі)		0,1	0,2	0,02

Аналогічно до результатів, отриманих щодо вмісту металів у ґрунті, за критерієм Фішера достовірно більшими значеннями вмісту у фітомасі всіх досліджуваних рослин відрізнявся свинець порівняно із кадмієм ($F_{\text{практ.}} (358,8) > F_{\text{теор.}} (6,4)$) та ртуттю ($F_{\text{практ.}} (0,008) < F_{\text{теор.}} (6,4)$). Оскільки гранично допустимих концентрацій вмісту металів у фітомасі дикорослих рослин наразі немає, отримані результати концентрації Cd, Pb, Hg у надземній фітомасі рослин порівнювали із гігієнічними нормативами для овочів, крім рослин виду *Leafy Brassica* (родини капустяних), вівсяного кореня, листових овочів та свіжих прямих трав, гриби (fungi), морські водорості та плоді овочі, який для свинцю становив 0,1 мг/кг, для кадмію (листові овочі, свіжі прями трав, рослин

виду *Leafy Brassica* (родини капустяних), селера, пастернак, вівсяний корінь, хрін) – 0,2 мг/кг, для ртуті – 0,1 мг/кг відповідно [23–24]. З огляду на ці гігієнічні нормативи, всі рослинні зразки перевищували норматив за вмістом ртуті та свинцю. Вміст кадмію становив більше 0,2 мг/кг для таких рослин: *Taraxacum officinale* L., *Plantago major* L., *Eryngium planum* L., *Polygonum aviculare* L. В зв'язку з тим, що вище зазначені види рослин використовуються традиційно в Україні як лікарські, доцільно було б регламентувати у них вміст кадмію, свинцю і ртуті.

Видова чутливість до поглинання металів у різних видів рослин залежить від «бар'єрного» або «безбар'єрного» механізму. Дерев'яний звичайний

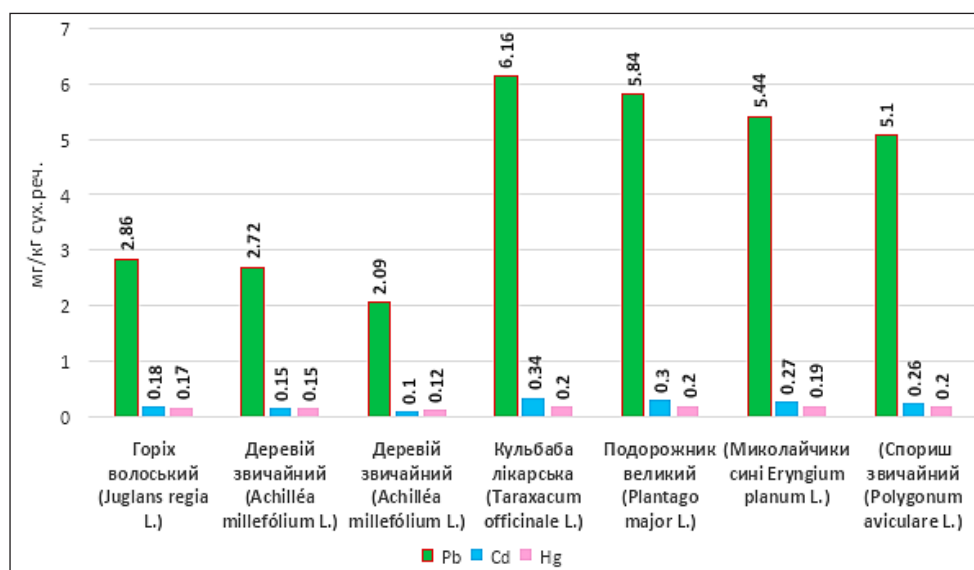


Рис. 4. Порівняльна оцінка різних видів рослин за вмістом металів

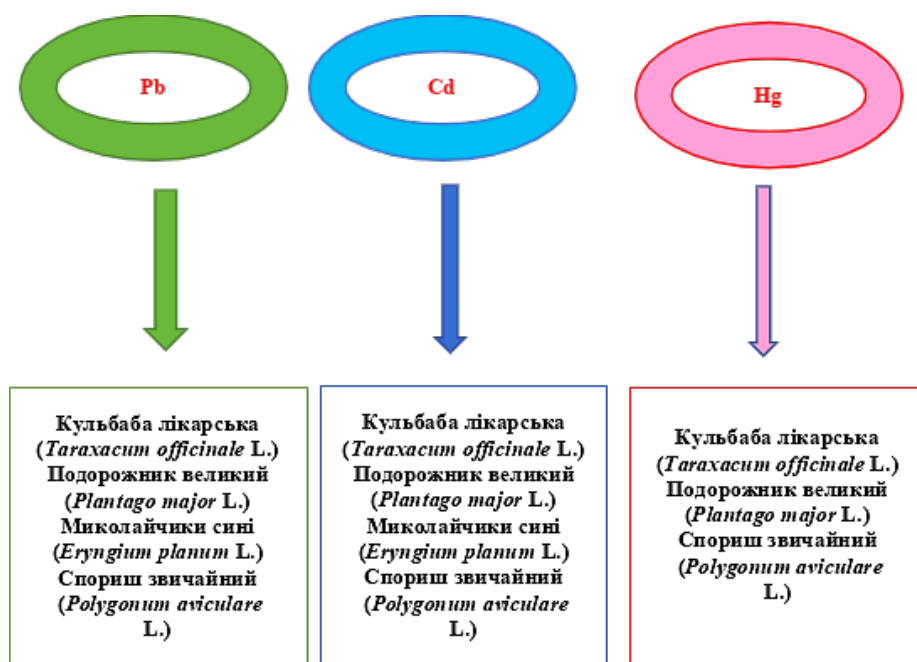


Рис. 5. Видова чутливість рослин щодо вмісту металів у фітомасі

Таблиця 4

Коефіцієнти біоаккумуляції Pb, Cd, Hg системи «грунт-рослина»

Рослина	Коефіцієнт біоаккумуляції		
	Pb	Cd	Hg
Горіх волоський (<i>Juglans regia</i> L.)	0,50	0,67	1,89
Деревій звичайний (<i>Achillea millefolium</i> L.)	0,48	0,56	1,67
Деревій звичайний (<i>Achillea millefolium</i> L.)	0,12	0,39	0,33
Кульбаба лікарська (<i>Taraxacum officinale</i> L.)	0,34	0,74	0,65
Подорожник великий (<i>Plantago major</i> L.)	0,32	0,65	0,65
Миколайчики сині (<i>Eryngium planum</i> L.)	0,33	0,84	0,66
Спориш звичайний (<i>Polygonum aviculare</i> L.)	0,2	0,62	1,18
$v, \%$	38,76	20,96	54,44
Стандартне відхилення (σ)	0,14	0,14	0,59
Дисперсія (S^2)	0,02	0,02	0,35

(*Achillea millefolium* L.) відрізнявся достовірно меншими значеннями вмісту всіх металів у фітомасі (рис. 4). Кульбаба лікарська (*Taraxacum officinale* L.) характеризувалась більшим вмістом свинцю з усіх досліджуваних рослин, що може бути пов'язано із наявністю безбар'єрного механізму поглинання цього металу.

Загалом *Taraxacum officinale* L. та *Plantago major* L. відрізнялися найбільшими абсолютними значеннями вмісту усіх металів (рис. 4), що може бути використано для фітореMediaції при забрудненні ґрунтів кадмієм, свинцем і ртуттю.

Коефіцієнти біоаккумуляції свинцю варіювали від 0,12 до 0,5, кадмію – від 0,39 до 0,74, ртуті від 0,33 до 1,89 відповідно. Найбільшими коефіцієнтами біоаккумуляції та помірною варіацією (30 % > v < 70 %) коефіцієнта біоаккумуляції характеризувався ртуттю, що свідчить як про різну видову чутливість щодо біодоступності металу, так і вплив середовища на біоаккумуляцію у рослин (табл. 4). Так, деревій звичайний мав різні коефіцієнти біоаккумуляції ртуті і свинцю на різних досліджуваних ділянках, що відрізнялися рівнем вмісту металів у ґрунті.

Хоча коефіцієнт кореляції між вмістом ртуті у ґрунті та рослині був найменшим серед усіх металів і становив 0,02. Коефіцієнт кореляції між вмістом кадмію у ґрунті та рослині був найвищим і становив 0,89, а свинцю – 0,61 відповідно, що свідчить про помірну кореляцію між вмістом цих металів у ґрунті та рослинами (рис. 6). Утім визначення повнішої кореляції між вмістом у ґрунті та рослині потребує подальших уточнюючих досліджень.

Коефіцієнти біоаккумуляції кадмію та свинцю мали низький рівень варіації, що свідчить про слабку варіативність біодоступності вище зазначених металів для різних видів рослин.

Juglans regia L. відрізнявся достовірно найбільшим коефіцієнтом біоаккумуляції ртуті та свинцю (рис. 6).

Найменшими коефіцієнтами біоаккумуляції відмічався деревій звичайний на досліджуваній ділянці м. Кривий Ріг, перехрестя вулиці Миколи Ходича та проспекта Карла Маркса.

Головні висновки. З'ясовано, що за показниками валовий вміст кадмію, свинцю та ртуті у ґрунті не перевищував встановлені нормативи гранично допустимих концентрацій. Найбільші значення валового вмісту у ґрунті мав свинець. Найменші значення вмісту свинцю та ртуті були зафіксовані

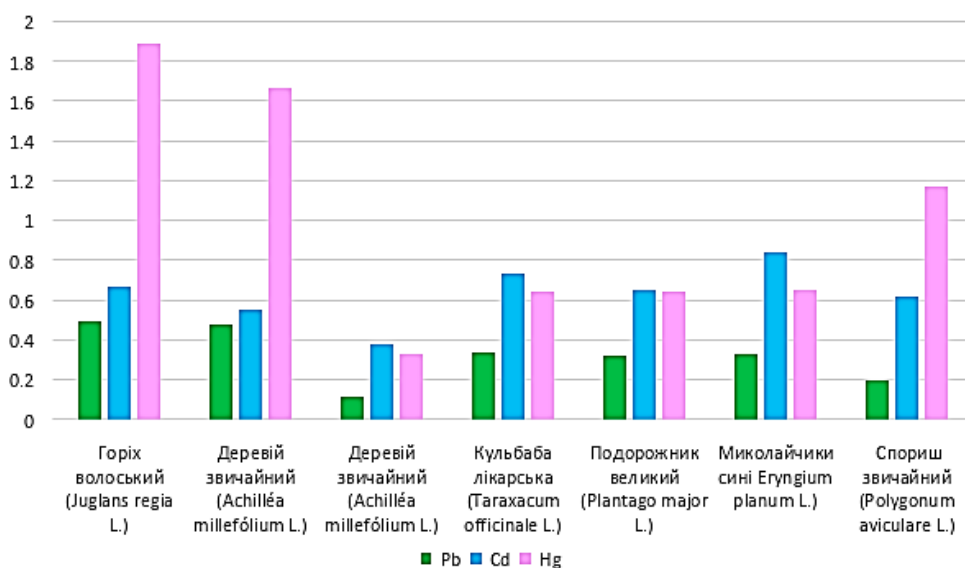


Рис. 6. Порівняння рослин за коефіцієнтами біоаккумуляції Cd, Pb, Hg

на вулиці Етузістів, найбільші – у межах пішохідного мосту, що по вулиці Дідро. Остаточні достовірні висновки щодо закономірностей розподілу вмісту металів у 0–20 см шарі ґрунту (залежно від розташування кар'єру «Південний») стане можливим за умови формування більшої вибірки значень у динаміці за часом та отримання рухомої форми металів у ґрунті.

Визначено, що вищими значеннями вмісту у фітомасі всіх досліджуваних рослин відрізнявся свинець порівняно із кадмієм та ртуттю. З огляду на те, що досліджувані рослини здебільшого використовуються традиційно в Україні як лікарські, доцільно було б регламентувати у них вміст кадмію, свинцю і ртуті. Так, приміром, деревій звичайний (*Achillea millefolium* L.) відрізнявся достовірно меншими значеннями вмісту всіх металів у фітомасі на ділянці м. Кривий Ріг – перехрестя вулиці Миколи Ходича та проспекту Карла Маркса. Кульбаба лікарська (*Taraxacum officinale* L.) порівняно з усіма досліджуваними рослинами, відрізнялася значнішим вмістом свинцю, що може бути пов'язано із наявністю безбар'єрного механізму поглинання цього металу. Така властивість рослин може бути використана для фіторе mediaції при забрудненні ґрунтів.

Розраховані коефіцієнти біоаккумуляції свинцю, які варіювали від 0,12 до 0,5, кадмію – від 0,39

до 0,74, ртуті – від 0,33 до 1,89 відповідно. Найбільшими коефіцієнтами біоаккумуляції та помірною варіацією (30 % > v < 70 %) коефіцієнта біоаккумуляції характеризувався ртуть, що свідчить як про різну видову чутливість щодо біодоступності металу, так і вплив середовища на біоаккумуляцію у рослин. Отже, коефіцієнти біоаккумуляції кадмію та свинцю мали низький рівень варіації, що свідчить про слабку варіативність біодоступності вище зазначених металів для різних видів рослин у досліджуваних умовах. За значенням коефіцієнта біоаккумуляції визначено такий ряд рослин: *Juglans regia* L. > *Polygonum aviculare* L. > *Taraxacum officinale* L. > *Eryngium planum* L. > *Plantago major* L. > *Achillea millefolium* L.

Перспективи використання результатів дослідження. Оскільки фітомаса *Taraxacum officinale* L. мала більший вміст свинцю з усіх досліджуваних рослин, то така властивість видів рослин може бути використана для фіторе mediaції при забрудненні ґрунтів. Результати досліджень можуть бути використані для уточнення екологічного моніторингу досліджуваної території, а також у процедурах оцінки впливу на довкілля та стратегічної екологічної оцінки з метою поліпшення стану компонентів довкілля на території Криворізького залізничного басейну.

Література

1. Soil contamination by heavy metals (2012). Europe environmental agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/soil-contamination-by-heavy-metals>
2. Contamination from local sources (2020). European Environmental Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/themes/soil/soil-threats>
3. Carmen Cristina Elekes (2014). Assessment of Historical Heavy Metal Pollution of Land in the Proximity of Industrial Area of Targoviste, Romania, Environmental Risk Assessment of Soil Contamination, Maria C. Hernandez-Soriano, IntechOpen, DOI: 10.5772/58304. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/46304>
4. Hannah Morgan, Róisín De Búrca, Ian Martin and Jo Jeffries (2009). Soil Guideline Values for mercury in soil. Science Report SC050021 / Mercury SGV. Esdat Environmental Database Management Software. 11 p.
5. Crommentuijn T., Polder M. D., Vab de Plasche E. J. (1997). Maximum Permissible Concentration and Negligible Concentration for metals. Taking Background Concentration into account. Netherlands. 260 p.
6. Самохвалова В., Фатеев А., Лучникова Є., Ликова О. (2019). Еколого-геохімічні дослідження вмісту різних форм Co, Ni, Cr у ґрунтах різного генезису в Україні. Вісник Львівського університету. Серія біологічна. 2012. Випуск 60. С. 171–181.
7. Martín F., Simón A., García I., Romero A., González V. (2014). Pollution of Pb in Soils Affected by Pyrite Tailings: Influence of Soil Properties in book *Environmental Risk Assessment of Soil Contamination*, Edited by Maria C. Hernandez Soriano. URL: <https://www.intechopen.com/chapters/46128>
8. Wuana Raymond A., Okieimen Felix E. (2011). Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. *International Scholarly Research Notices*. Vol. 2011. URL: <https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/402647/>
9. Kubier A., Wilkin R. T., Pichler T. (2019). Cadmium in soils and groundwater: A review. *Appl Geochem*. Pp. 108:1–16.
10. Gworek B., Dmuchowski W. & Baczewska-Dąbrowska A. H. (2020). Mercury in the terrestrial environment: a review. *Environ Sci Eur*. Vol. 32, 128. URL: <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/s12302-020-00401-x#citeas>
11. Ryzhenko N., Yastrebtsova N., Ryzhenko D. (2020). Cd and Pb In The “Soil-Plant” System of Holosiyiv Green Park Area in Kyiv. *Polish Journal of Soil Science*. Vol. 53 (2). Pp. 200–210.
12. Kabata-Pendias Alina, Mukherjee Arun B. (2007). Trace Elements from Soil to Human. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag. 550 p.
13. Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals (GHS). 2021. UNECE. URL: <https://unece.org/about-ghs>
14. Доспехов Б. А. (1985). Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Ленинград : Агропромиздат. 351 с.
15. Ивантер Э. В., Коросов А. В. (2010). Элементарная биометрия : учеб. пособие. Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 104 с.
16. Якість ґрунту. Вибір проб ґрунту: ДСТУ 4287:2004 [Чинний від 2005–01–07]. К. : Держспоживстандарт України, 2005. 9 с. (Національний стандарт України).

17. «Сырьё и продукты пищевые. Атомно-абсорбционный метод определения токсичных элементов», Киев Госстандарт Украины 2001.
18. What are the main pressures on Europe's nature? Infographic. (2021). European Environmental Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2021/infographics/what-are-the-main-pressures/view>
19. Heavy metal emissions in Europe. Indicator Assessment (2021). European Environmental Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea32-heavy-metal-hm-emissions-2/assessment>
20. Indicator Assessment. Heavy Metal Emissions (2021). European Environmental Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/eea32-heavy-metal-hm-emissions-1/assessment-10>
21. Global Mercury Assessment Sources, emissions, releases and environmental transport. UNEP Chemicals and Health Branch, Geneva, Switzerland (2019). URL: <https://www.unep.org/explore-topics/chemicals-waste/what-we-do/mercury/global-mercury-assessment>
22. Клімат. Кривий Ріг, 2021.
23. Методичні вказівки «Визначення вмісту ртуті в об'єктах виробничого, навколишнього середовища і біологічних матеріалах», затверджені Наказом МОЗ України № 263 від 10.06.2005. Законодавство України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0263282-05#Text>
24. Державні гігієнічні правила і норми «Регламент максимальних рівнів окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах». Наказ МОЗ 13.05.2013, № 36. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0774-13>