

## БІОАКУМУЛЯЦІЯ Hg, Cr, Zn, As, Cd, Pb, Cu У СИСТЕМІ «ГРУНТ-РОСЛИНА» В ЗОНІ ВПЛИВУ ПІДПРИЄМСТВ З ВИРОБНИЦТВА І ПЕРЕРОБКИ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

Бондар О.І.<sup>1</sup>, Риженко Н.О.<sup>1</sup>, Лаптев В.Е.<sup>1</sup>, Махнюк В.М.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ДЗ «Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління»  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ

<sup>2</sup>ДУ «Інститут громадського здоров'я імені О.М. Марзєєва  
Національної академії медичних наук України»

вул. Попудренка, 50, 02094, м. Київ

alsko2011@ukr.net, velicmt@ukr.net, smogil@ukr.net

Досліджений вплив забруднення токсичними металами (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) на компоненти екосистем. Зазначено, що умови накопичення та транслокації сьогодні набувають загрозливих масштабів. Під час оцінки стану якості навколишнього природного середовища, одним з головних чинників є біодоступність металів, та їх здатність до біоаккумуляції в системі «грунт-рослина». З метою визначення умісту і впливу токсичних металів, зокрема миш'яку, кадмію, хрому, міді, ртуті, свинцю та цинку, була обрана територія неподалік підприємств з виробництва та переробки акумуляторних батарей у місті Дніпро, що має значне антропогенне навантаження. З'ясовано, що за валовим умістом в ґрунті (0-20 см) метали можна розташувати так: Zn>Pb>Cu>Cd, а за умістом рухливої форми – Pb>Zn>Cd. У загальній фітомасі *Matricaria chamomilla* L. визначена така послідовність металів: Pb>Cr>Cu>Zn>As>Cd>Hg, проте найбільший уміст металів накопичується у вегетативній фракції фітомаси рослини. За умістом у фракціях фітомаси досліджувані забруднювачі можна розташувати у такі ряди: підземна фітомаса: Pb> Cr>Cu>Cd>Zn>Hg>As; генеративна фітомаса: Cr>Pb>Cu>As>Zn>Hg>Cd; листя: Cr>Pb>Cu> Zn> As>Hg>Cd; стебла: Cr>Pb>Cu> Zn> As> Cd>Hg. За інтенсивністю біоаккумуляції у *Matricaria chamomilla* L. визначений такий порядок розташування металів: Cd>Pb>Zn. Найвищий коефіцієнт біоаккумуляції кадмію спостерігається у підземній фракції фітомаси, найнижчий – генеративної фракції. У свинцю і цинку найвищий коефіцієнт біоаккумуляції визначено в листях *Matricaria chamomilla* L., найнижчий – в стеблі і коріннях відповідно. Загалом найвищий коефіцієнт біоаккумуляції мав кадмій, що свідчить про його біодоступність і здатність до значної біоаккумуляції. *Ключові слова:* метали (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn), біоаккумуляція, біодоступність, забруднення, фітомаса, ґрунт, *Matricaria chamomilla* L.

### Bioaccumulation of Hg, Cr, Zn, As, Cd, Pb, Cu in the "soil-plant" system in the area of influence of enterprises for the production and processing of batteries. Bondar O., Ryzhenko N., Laptiev V., Makhniuk V.

The influence of toxic metal pollution (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn) on ecosystem components has been studied. It is noted that the conditions of accumulation and translocation are becoming threatening today. When assessing the quality of the environment, one of the main factors is the bioavailability of metals and their ability to bioaccumulate in the soil-plant system. In order to determine the content and effects of toxic metals, including arsenic, cadmium, chromium, copper, mercury, lead and zinc, the area near the enterprises for the production and processing of batteries in the city of Dnipro, which has a significant anthropogenic load, was selected. It was found that according to the gross content in the soil (0-20 cm) metals can be arranged as follows: Zn> Pb> Cu> Cd, and according to the content of the mobile form – Pb> Zn> Cd. The following sequence of metals has been determined in the total phytomass of *Matricaria chamomilla* L.: Pb> Cr> Cu> Zn> As> Cd> Hg, but the highest content of metals accumulates in the vegetative fraction of plant phytomass. According to the content of phytomass fractions, the studied pollutants can be arranged in the following series: underground phytomass: Pb> Cr> Cu> Cd> Zn> Hg> As; generative phytomass: Cr> Pb> Cu> As> Zn> Hg> Cd; leaves: Cr> Pb> Cu> Zn> As> Hg> Cd; stems: Cr> Pb> Cu> Zn> As> Cd> Hg. According to the intensity of bioaccumulation in *Matricaria chamomilla* L. the following order of metal distribution is determined: Cd> Pb> Zn. The highest coefficient of cadmium bioaccumulation is observed in the underground fraction of phytomass, the lowest – in the generative fraction. In lead and zinc, the highest bioaccumulation coefficient is determined in the leaves of *Matricaria chamomilla* L., the lowest – in the stem and roots, respectively. In general, cadmium had the highest bioaccumulation coefficient, which indicates its bioavailability and ability to significantly bioaccumulate. *Key words:* metals (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Zn), bioaccumulation, bioavailability, pollution, phytomass, soil, *Matricaria chamomilla* L.

**Постановка проблеми.** Протягом багатьох років навколишнє природне середовище України, і Дніпровського регіону зокрема, підлягають значному техногенному навантаженню. Місто Дніпро є одним з найрозвиненіших промислових центрів України, і, відповідно – найзабрудненіших. Одним з головних чинників забруднення є токсичні метали, що потрапляють у навколишнє середовище завдяки експлуатації автотранспорту, енергетичних підприємств, чорної та кольорової металургії, зокрема,

підприємств з виробництва та переробки акумуляторних батарей. Уміст і вплив на компоненти довкілля в м. Дніпро, зокрема, на фітокомпонент, а також біоаккумуляція таких елементів як миш'як, кадмій, хром, мідь, ртуть, свинець, цинк досліджено недостатньо. Основним забруднювачем під час роботи таких підприємств є свинець і його сполуки, речовина 1 класу небезпеки, що надходить у навколишнє середовище головним чином з атмосферним повітрям [1]. Вплив на живі організми,

наявність і дослідження інтенсивності біоаккумуляції свинцю та інших металів нині набуває все більшої актуальності. Відповідно до сучасних вітчизняних і світових досліджень присутність у ґрунтах значної кількості таких поліютантів, як As, Cd, Cr, Cu, Hg, Zn також викликає занепокоєння, оскільки у надмірних кількостях вони спричиняють негативні зміни як якісні, так і кількісні у функціонуванні біоти, а відтак – і екосистем в цілому [2-6]. Дослідження закономірностей біодоступності для рослин таких забруднювачів, як метали, на територіях із високим антропогенним навантаженням є одним із важливих наукових прикладних завдань, оскільки здатність до біоаккумуляції, що залежать від фізико-хімічних властивостей поліютанту та його кількості, типу ґрунту, видових особливостей рослинного організму тощо, характеризує поведінку токсиканту в екосистемі. У свою чергу, концентрація в ґрунті доступних форм токсичних металів пов'язана із хімічним складом техногенних викидів, буферними властивостями ґрунту. Так, рухомі форми свинцю і цинку акумулюються здебільшого у гумусному шарі ґрунту, мідь і кадмій мігрують до більш глибоких шарів ґрунту.

**Метою роботи** було оцінювання біоаккумуляції ртуті (Hg), хрому (Cr), цинку (Zn), миш'яку (As), кадмію (Cd), свинцю (Pb), і міді (Cu) у системі «ґрунт-рослина» в зоні впливу підприємств з виробництва і переробки акумуляторних батарей ЗАТ «ІСТА-ЦЕНТР» та ТОВ «Укрсплав» в м. Дніпро.

**Умови та методи проведення дослідження.** Для досліджень була обрана ділянка в лісопарковій смузі ж/м Північний, що поділяє промислову і селітебні зони, та розташована на межі розрахункової санітарно-захисної зони підприємства з переробки аку-

муляторних батарей ТОВ «УКРСПЛАВ» (700 м від основних джерел викидів) (рис. 1).

Варто зазначити, що у промисловій зоні окрім підприємства з переробки акумуляторних батарей і заводу з виробництва акумуляторних батарей, також розташоване підприємство зі збору лому чорних і кольорових металів (Дніпропетровський втормет) та інші підприємства, робота яких ймовірно також впливає на антропогенне походження металів на досліджуваній території. Загалом територія проведення досліджень у місті Дніпро досить трансформована завдяки антропогенній діяльності – забудовані землі становлять 53% [7].

Досліджувані ґрунти – чорноземи звичайні мало-гумусні. Зразки ґрунту та рослин відбирали в червні-липні 2021 року згідно з вимогами ДСТУ (ДСТУ 4287:2004, ДСТУ ISO 10381-4-2005) у межах 1 пробної ділянки. Площа пробної ділянки становила 100 м<sup>2</sup>, у межах пробної ділянки зразки ґрунту відбиралися методом конверту з формуванням одного репрезентативного зразка. Глибина відбору ґрунтових зразків була в межах 0–20 см і 20–40 см. На ділянці відбиралися зразки надземної (вегетативна фракція, генеративна фракція) та підземної фітомаси рослини ромашки лікарської (*Matricaria chamomilla* L.). Аналіз зразків ґрунту (екстракція ацетатно-амонійним буфером рН 4,8) і рослин (екстракція сумішшю концентрованих кислот HNO<sub>3</sub> та H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) здійснювали методом атомно-абсорбційної спектрометрії в умовах “Придніпровського регіонального центру з питань еколого-гігієнічної та медико-біологічної оцінки промислових відходів (Н-ВТК “Центр”) Дніпровського державного медичного університету. Статистична обробка експериментальних даних

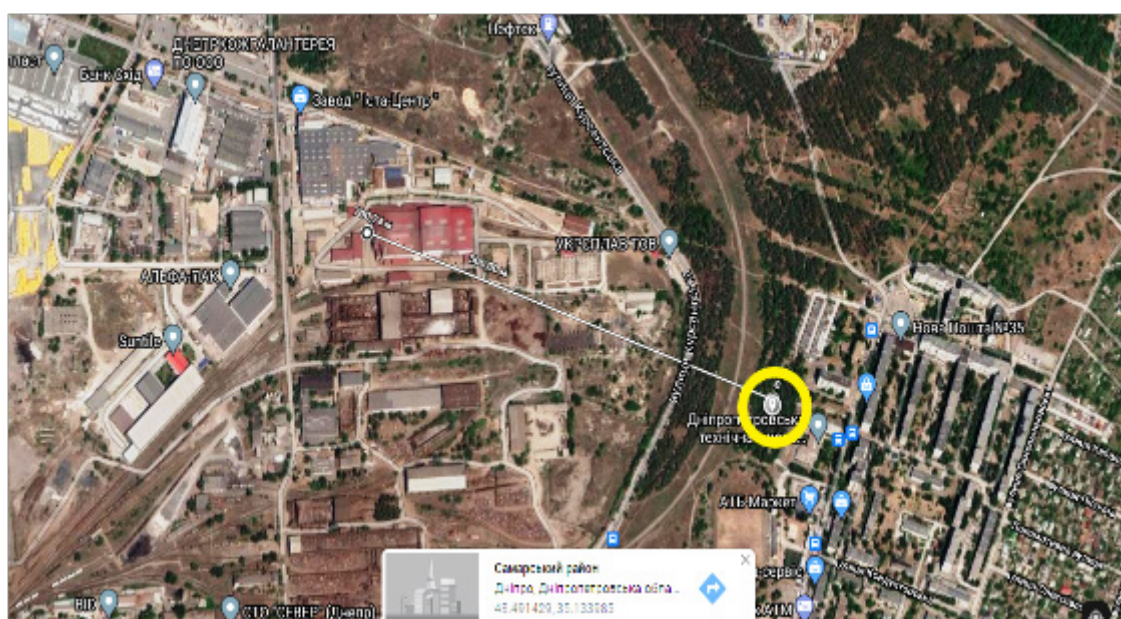


Рис. 1. Місце відбору проб

Таблиця 2

**Уміст металів у фракціях фітомаси  
*Matricaria chamomilla* L.**

Фракція фітомаси	Елемент	Результат дослідження ( $\bar{X}$ ), мг/кг	
Генеративна фракція	As	1,548	
	Cd	0,3802	
	Cr	3,753	
	Cu	3,137	
	Hg	0,7505	
	Pb	3,155	
Вегетативна фракція	Листя	Zn	1,26
		As	2,303
		Cd	0,971
		Cr	5,464
		Cu	4,782
		Hg	1,114
	Стебла	Pb	5,273
		Zn	2,665
		As	0,9938
		Cd	0,9349
		Cr	2,358
		Cu	1,8494
		Hg	0,483
		Pb	2,328
Підземна фракція	Zn	1,039	
	As	0,0575	
	Cd	1,222	
	Cr	1,937	
	Cu	1,565	
	Hg	0,4152	
Елемент	Pb	3,593	
	Zn	0,4926	
Елемент		Коефіцієнт варіації по фракціях фітомаси <i>Matricaria chamomilla</i> L., v, %	
As		80,5	
Cd		46,6	
Cr		50,7	
Cu		55,1	
Hg		49,1	
Pb		39,9	
Zn		77,4	

Таблиця 1

**Уміст металів у ґрунті**

Забруднювач	Форма	Результат дослідження ( $\bar{X}$ ), мг/кг		ГДК, мг/кг
		0-20 см	20-40 см	
As	Валова	-*	-	2,0
	Рухлива	-	-	-
Cd	Валова	0,0217	0,0295	1,5
	Рухлива	0,0011	0,0215	-
Cr	Валова	-	-	0,05
	Рухлива	-	-	6,0
Cu	Валова	10,0101	8,4793	-
	Рухлива	-	-	3,0
Hg	Валова	-	-	2,1
	Рухлива	-	-	-
Pb	Валова	38,3073	16,7467	32,0
	Рухлива	11,2773	0,1684	6,0
Zn	Валова	54,2843	43,0751	-
	Рухлива	7,4265	3,7129	23,0

\* нижче чутливості методу визначення

проведена з використанням пакету прикладних програм Microsoft Excel за загальноприйнятими в біометрії методиками [8].

Для аналізу одержаних результатів користувалися кореляційним та дисперсійним статистичними методами обробки. Рівень достовірності обчислювали при  $P_{0,95}$ . На всій досліджуваній території були проведені вимірювання вмісту металів у ґрунті та рослинах і розраховано коефіцієнт біокумуляції ( $K_b$ ) токсикантів за рівнянням [3-5]:

$$K_b = \text{Conc}_{\text{росл}} / \text{Conc}_{\text{ґрунт}} \quad (1),$$

де  $K_b$  – коефіцієнт біокумуляції;

$\text{Conc}_{\text{росл}}$  – концентрація у рослині сух. реч. (частина фітомаси), мг/кг;

$\text{Conc}_{\text{ґрунт}}$  – концентрація рухливої форми у ґрунті, мг/кг.

**Викладення основного матеріалу.** Уміст металів у ґрунті (0-20 см, 20-40 см) і рослині наведений у таблицях 1-2. Уміст у ґрунті кадмію і цинку не перевищував установлені нормативи гранично допустимих концентрацій (ГДК), а миш'яку, хрому, міді і ртуті був нижче чутливості визначення. Проте перевищення вмісту ГДК рухливої форми свинцю у ґрунті склало майже в 2 рази [9]. За валовим умістом у ґрунті метали можна розташувати у ряд:  $Zn > Pb > Cu > Cd$ . За умістом рухливої форми у ґрунті (0-20 см) метали розташовуються у ряд:  $Pb > Zn > Cd$ .

Найбільшим коефіцієнтом варіації характеризувався миш'як ( $v=80,5\%$ ), що свідчить про неоднорідний розподіл елемента у різних фракціях фітомаси. При цьому найменшою концентрацією As характеризувалась підземна фракція фітомаси, що може бути пов'язано із безбар'єрним механізмом надходження елемента до надземної фракції. Найбільша кількість миш'яку зафіксована у листі,

що також може свідчити про фоліарний шлях його надходження до рослини за умов антропогенного забруднення. За умістом As фракції фітомаси можуть розташовуватися у ряд: листя > генеративна фракція > стебла > підземна фракція.

Загалом уміст всіх досліджуваних металів у фракціях фітомаси *Matricaria chamomilla* L. представлений на рисунку 2. Найбільший уміст Cr, Pb у *Matricaria chamomilla* L. виявлено в листях рослини, що для цих забруднювачів може свідчити про повітряний характер поглинання, або безбар'єрний

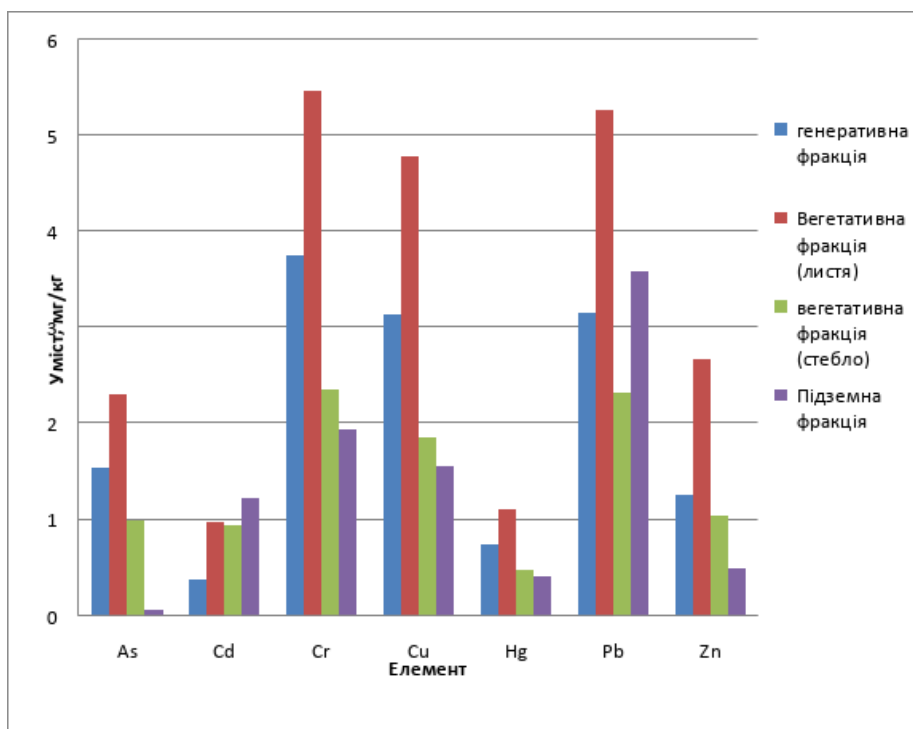


Рис. 2. Уміст металів у фракціях фітомаси *Matricaria chamomilla* L.

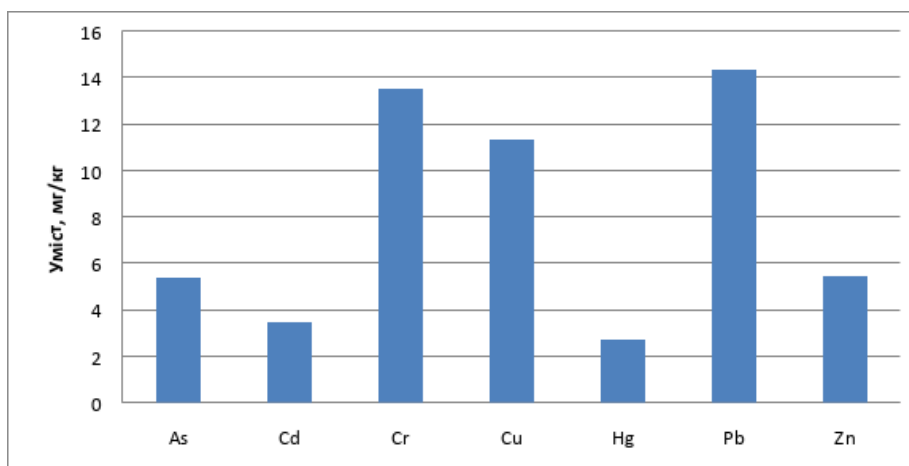


Рис. 3. Загальний уміст металів у фітомасі *Matricaria chamomilla* L.

механізм біодоступності цих елементів з ґрунту до вегетативної фракції фітомаси. Свинець – це єдиний серед досліджуваних забруднювачів, що характеризувався найбільшим умістом у підземній фракції фітомаси, що ймовірно характеризує також високу біодоступність металу з ґрунту; це підтверджує найменший коефіцієнт варіації ( $v=39,9\%$ ), котрий може свідчити про різні шляхи поглинання металу рослиною. Найбільшою кількістю у генеративній фітомасі відзначався хром. Кадмій і ртуть – метали, що мали найменшу кількість у надземній фракції фітомаси. Ромашка лікарська традиційно широко вживана рослина в Україні, проте уміст металів у фітомасі лікарських рослин нині не нор-

мується. Якщо концентрації досліджуваних елементів у фітомасі *Matricaria chamomilla* L. порівняти із існуючими нормативами для рослин виду *Leafy Brassica* (родини капустяних), вівсяним коренем та листовими овочами, для яких встановлено максимально допустимі рівні, то найбільші перевищення складатимуть для Pb 17,6 ГДК у вегетативній фракції рослини (листя) та Cd 6,1 ГДК у підземній фракції [10]. Слід зазначити, що уміст Cr, Cu, Zn на сьогодні не нормується взагалі, уміст As та Hg нормується лише для рисових продуктів та морепродуктів і дієтичних добавок відповідно. З огляду на це, доцільно запровадити нормування металів у лікарських видах рослин.



За умістом у *Matricaria chamomilla* L. досліджувані забруднювачі можна розташувати у такі ряди:

- підземна фітомаса: Pb>Cr>Cu>Cd>Zn>Hg>As;
- генеративна фітомаса: Cr>Pb>Cu>As>Zn>Hg>Cd;
- вегетативна фітомаса (листя): Cr>Pb>Cu> Zn>As>Hg>Cd;

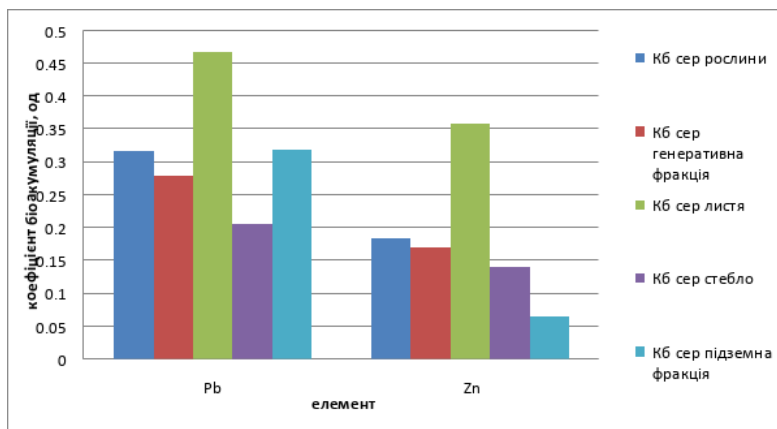
– вегетативна фітомаса (стебла): Cr>Pb>Cu> Zn>As> Cd>Hg.

Загальний уміст металів у фітомасі *Matricaria chamomilla* L представлено на рисунку 3. За умістом у загальній фітомасі метали розташовуються у такій послідовності: Pb>Cr>Cu>Zn>As>Cd>Hg.

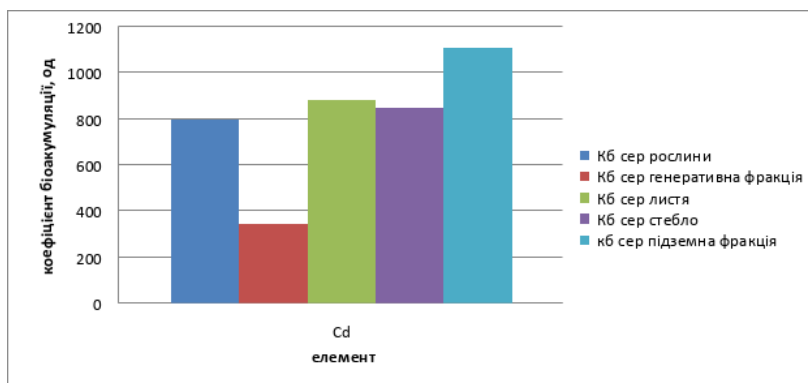
Зважаючи на те, що для декотрих металів уміст рухливої форми був нижче межі визначення, розрахунок коефіцієнтів біоаккумуляції здійснювали для Cd, Pb, Zn (табл. 4, рис. 4).

Згідно з статистичними розрахунками отриманих результатів, коефіцієнт варіації за Cd мав понад 100%. Найвищий коефіцієнт біоаккумуляції кадмію виявлено для підземної фракції фітомаси, найнижчий – для генеративної фракції. У свинцю і цинку найвищий коефіцієнт біоаккумуляції визначено в листях *Matricaria chamomilla* L., найнижчий – в стеблі та коріннях відповідно. Загалом найвищий коефіцієнт біоаккумуляції мав кадмій, що свідчить про його біодоступність і здатність до значної біоаккумуляції. За інтенсивністю біоаккумуляції у *Matricaria chamomilla* L. з ґрунту на досліджуваній території визначено такий ряд металів: Cd>Pb>Zn, що корелює з результатами інших досліджень [3-5].

**Висновки.** Визначено перевищення умісту свинцю ГДК в ґрунті (рухлива форма) на досліджува-



а) Pb та Zn



б) Cd

Рис. 4. Коефіцієнти біоаккумуляції

Таблиця 4

Коефіцієнт біоаккумуляції у системі «ґрунт – рослина»

Метал	Кб ( $\bar{x}$ ), генеративна фракція	Кб ( $\bar{x}$ ), вегетативна фракція (листя)	Кб ( $\bar{x}$ ), вегетативна фракція (стебло)	Кб ( $\bar{x}$ ), підземна фракція	Кб ( $\bar{x}$ ), фітомаси рослини
Cd	345,64	882,73	849,91	1110,91	797,3
Pb	0,28	0,4676	0,206	0,3186	0,318
Zn	0,17	0,359	0,14	0,0663	0,184

ній території в 1,9 разів. За умістом у загальний фітомасі *Matricaria chamomilla* L. метали розташовуються у такій послідовності: Pb>Cr>Cu>Zn>As>Cd>Hg.

За умістом у фракціях фітомаси досліджувані забруднювачі можна розташувати у такому порядку:

– підземна фітомаса: Pb> Cr>Cu>Cd>Zn>Hg>As;

– генеративна фітомаса: Cr>Pb>Cu>As>Zn>Hg>Cd;

– вегетативна фітомаса (листя): Cr>Pb>Cu> Zn>As>Hg>Cd;

– вегетативна фітомаса (стебла):Cr>Pb>Cu> Zn>As> Cd>Hg.

За інтенсивністю біоаккумуляції у *Matricaria chamomilla* L. визначено такий ряд металів: Cd>Pb>Zn. Виявлені закономірності можуть бути використані при прогнозуванні процесів накопичення металів у рослинах, що є важливою складовою нормування антропогенного навантаження та екологічної безпеки.

### Література

1. Наказ від 14.01.2020 р. №52 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць» / Міністерство охорони здоров'я України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-20/conv#n24> (дата звернення 25.11.2021).
2. Jozef Kobza. Arsenic in agricultural soils of Slovakia. Polish journal of soil science vol. LIV/1 2021 PL ISSN 0079-2985 DOI:10.17951/pjss/2021.54.1.89; Pp. 89-101.
3. Н. О. Риженко. Фітотоксикологічна оцінка ризику небезпечності металів за їх біокумуляцією в природних екосистемах. Вісник ЖНАЕУ, 2017, № 2 (61), т. 1; С. 110-115.
4. Н. О. Риженко. Принципи фітотоксикологічного нормування металів. Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4/2017 (105). С.96-102.
5. Бондар О.І., Риженко Н.О., Жаврида Д.Є. Біоаккумуляція меркурію ( $Hg^{2+}$ ), хрому ( $Cr^{6+}$ ) та цинку ( $Zn^{2+}$ ) у екосистемах Обухівського району Київської області. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.2-35.15>. С. 90-93.
6. К.В. Вовк, А.І. Самчук, Е.С. Попенко, Т.В. Огар, В.Й. Манічев. Важкі метали у поверхневих відкладах Київського мегаполісу. Геохім. та рудоутв. 2014. Вип. 34. С. 92-97.
7. Екологічний паспорт м. Дніпро. 2016. Департамент транспорту та охорони навколишнього середовища Дніпропетровської міської ради. 64 с.
8. Ивантер Э.В., Коросов А.В. Элементарная биометрия. Петрозаводск : Изд-во ПетрГУ, 2010. 104 с.
9. Наказ від 14.07.2020р. №1595 «Про затвердження Гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті» / Міністерство охорони здоров'я України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20/conv#n2> (дата звернення 26.11.2021).
10. Наказ від 13.05.2013р. №368 «Про затвердження Державних гігієнічних правил і норм «Регламент максимальних рівнів окремих забруднюючих речовин у харчових продуктах» / Міністерство охорони здоров'я України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0774-13#n16> (дата звернення 26.11.2021).