
ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ПИТАННЯ В ГАЛУЗІ ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ

УДК 635.49:631.427.1(477.63-21)

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.6-33.26>

TARAXACUM OFFICINALE WIGG ЯК БІОІНДИКАТОР АКУМУЛЯЦІЇ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ҐРУНТІ ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНОГО РЕГІОНУ

Комарова І.О.

Криворізький державний педагогічний університет
пр. Гагаріна, 54, 50086, м. Кривий Ріг, Дніпропетровська обл.
Irinysich@i.ua

Основною містобудівного комплексу міста Кривий Ріг є залізорудна промисловість, яка базується на одному із найбільших у світі родовищ. Результатом антропогенної діяльності в місті є порушення біогеохімічних циклів і накопичення важких металів у верхніх шарах літосфери, їх поглинання рослинами з подальшою міграцією трофічним ланцюгом. Деякі рослини досить стійкі до забруднення ґрунтів і можуть використовуватися як біоіндикатори. Саме тому використання найрозповсюдженіших видів урбанофлори в системі екологічного моніторингу дозволяє оцінювати рівень забруднення різних міст і промислових агломерацій.

У публікації проаналізовано валовий і рухомий вміст важких металів (Zn, Pb, Cd, Ni, Cu) в урбоєкосистемі Кривого Рогу. Серед металів першого та другого класів небезпеки зафіксовано пропорційне збільшення їх вмісту від умовного контролю до ділянок високого рівня забруднення. Встановлено, що вміст кадмію дещо знижений порівняно із контролем на ділянках, розташованих у зонах із незначним і помірним рівнями забруднення. Визначено спадаючий ряд рухомих форм важких металів на ділянках із високим і помірним рівнями забруднення: $Zn > Pb > Cu > Ni > Cd$, а для незначного рівня та умовного контролю він трансформований так: $Zn > Ni > Pb > Cu > Cd$.

Встановлено, що абсолютним лідером за накопиченням і безбар'єрною міграцією в системі «ґрунт – корені рослин» є цинк. Зафіксовано активне накопичення коренями рослин нікелю та кадмію із чіткою закономірною градацією між ділянками різного рівня забруднення. Незважаючи на високі концентрації кадмію в коренях, виявлений міцний антиконцентраційний бар'єр для мікроелементу як у контролі, так і за умов забруднення (транслокаційні коефіцієнти $< 1,0$).

В умовах забруднення *T. officinale* не є металоконцентратором купруму, а з підвищенням рівня забруднення і плюмбуму. Наявність зв'язку між накопиченням важких металів у ґрунті та коренях рослин дозволяє використовувати *Taraxacum officinale* Wigg для здійснення біоіндикації. *Ключові слова*: техногенне середовище, важкі метали, транслокаційні коефіцієнти, забруднення, стійкість рослин, біоіндикація, *Taraxacum officinale* Wigg.

***Taraxacum officinale* Wigg as a bioindicator of heavy metals accumulation in soil of the mining and metallurgical region.**
Комарова І.

Soil is an active acceptor for some elements, heavy metals in particular. Microelements are firmly sorbed and interact with soil humus layer. As a result, poorly soluble compounds are formed. Disruption of biogeochemical cycles leads to heavy metal accumulation in top layers of lithosphere and their uptake by plants with further migration in trophic chain. At the same time some plants are sensitive to soil contamination and can be used as bioindicators.

The objective of the paper is to assess protective attributes and specifics of translocation of different threat level elements of a synanthrope – *Taraxacum officinale* Wigg. The object of the study is the roots of *Taraxacum officinale* Wigg and the soils of plant habitat. Sampling sites were constructed in administrative regions of Kryvyi Rih city with different levels of emissions release into atmosphere from stationary pollution sources.

Technogenicity of researched heavy metal mobile forms for the areas of high and moderate contamination forms a falling row which is ranked as follows: $Zn > Pb > Cu > Ni > Cd$. But a nonsignificant difference was fixed in cadmium and nickel accumulation in the area № 4. For sampling sites of insignificant level and conditional control heavy metal accumulation row is ranked as follows: $Zn > Ni > Pb > Cu > Cd$.

The results of the determination of Ni, Cu, Zn, Pb and Cd content in plants roots indicate that *Taraxacum officinale* Wigg is capable of their accumulation. Zn is an absolute leader in accumulation and barrier-free migration in the system “soil-plants roots”. We were observing mobility decrease of one of the most dangerous elements – Cd. The interrelation between heavy metal accumulation in soil and plants roots enables to use *Taraxacum officinale* Wigg for applying phytoindication. We consider it essential to conduct further detailed research of *Taraxacum officinale* adaptive reactions with a view to further creating of bioindication scales. *Key words*: soil, plant, translocation coefficient, technogenic environment, heavy metals, contamination, *Taraxacum officinale* Wigg, bioindication.

Постановка проблеми. В умовах зростаючого рівня забруднення навколишнього середовища гірничо-металургійних регіонів України актуальності набуває питання ранньої діагностики якості довкілля. В цьому аспекті не виключенням є екологічний стан Кривого Рогу, який характеризується значним рів-

нем забруднення важкими металами атмосфери, ґрунтів і формуванням техногенних ландшафтів, що актуалізує розробку та впровадження інноваційних природоохоронних заходів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Едафотопи є активними акцепторами більшості елементів і їхніх сполук, зокрема й важких металів (далі – ВМ) [1; 2]. Мікроелементи активно сорбуються та взаємодіють із гумусовими сполуками, в результаті чого їхня рухливість зменшується [3]. Поряд із цим необхідним складником моніторингових досліджень урболандшафтів є визначення спроможності певних елементів до транслокації в системі «ґрунт – рослина» [4; 5].

У вегетативних органах рослин часто фіксують різну концентрацію важких металів, що зумовлено властивостями самих мікроелементів і видоспецифічністю метаболічних процесів у рослинах. Так, вміст Cd у рослинах залежить від біологічних особливостей і наявності елементостатичних бар'єрів на кордоні «корінь – стебло» [6; 7]. Коливання вмісту Cu на різних ґрунтах і в кліматичних умовах вказує на значну варіабельність його накопичення рослинами [8; 9; 10].

При вивченні особливостей надходження Zn у рослини був виявлений ген ZNT1, який відповідає за його транспортування [11]. Іони Pb стимулюють процеси пероксидного окиснення ліпідів, що підтверджується підвищенням вмісту ТБК-активних продуктів у вегетативних органах [12]. Вміст Ni у ґрунтах здебільшого залежить від забезпеченості елементом ґрунтоутворюючих порід. Найбільші концентрації Ni здебільшого становлять до 3,0 мг/кг при варіаціях у різних видах рослин від 0,1 до 8,1 мг/кг [13]. Аналіз наукової літератури свідчить, що індикаторними видами техногенного забруднення можуть слугувати сільськогосподарські культури [14; 15], деревні рослини [16; 17], трав'яністі види [9; 18].

Новизна. Дослідження пристосувань певних видів рослин до дії полютантів не втрачає актуальності для практичного застосування в біоіндикації стану довкілля, а також має теоретичне значення для подальшого розвитку екологічної фізіології рослин. Проте визначення особливостей накопичення важких металів та їхніх транслокацій у розповсюджених видів урбанofлори, зокрема *Taraxacum officinale* Wigg., в умовах Криворіжжя ще не розглядалося.

Мета дослідження – визначити рівень акумуляції важких металів різного класу небезпеки в едафотопях Кривого Рогу та з'ясування можливості використання *Taraxacum officinale* Wigg для здійснення біоіндикації довкілля в гірничо-металургійному регіоні.

Матеріал і методи дослідження. Об'єктом дослідження були ґрунти і корені *Taraxacum officinale* Wigg. Пробні площадки закладалися в чотирьох адміністративних районах Кривого Рогу

з різним рівнем надходження викидів від стаціонарних джерел забруднення в атмосферне повітря (за даними Головного управління статистики). Так, у Металургійному районі (понад 102,4 тис. т на рік) закладені пробні площадки №№ 1-4 із високим рівнем забруднення. У Покровському і Довгинцевському районах (обсяги викидів 3,8 і 2,4 тис. т) розташовані площадки №№ 5-6 із помірним рівнем забруднення. У Саксаганському районі, в якому найменші обсяги викидів (до 640 т), закладені площадки №№ 7-8 із незначним рівнем забруднення. Територія умовного контролю розташована на відстані понад 50 км від промислових підприємств (площадка № 9).

Проби ґрунту відбиралися на кожній ділянці методом «конверта» з шару ґрунту 0-10 см, висушувалися до абсолютно сухої ваги, потім із них складали репрезентативний зразок. Відбір та пробопідготовку рослинного матеріалу, аналіз проб здійснювали за загальноприйнятими методиками [19; 20]. Вміст валових і рухомих (амонійно-ацетатна витяжка рН = 4,8) форм Zn, Pb, Cu, Ni, Cd у ґрунтах та елементів у рослинному матеріалі визначали на атомно-абсорбційному спектрофотометрі С-115 (Україна). Коефіцієнт транслокації розраховували як співвідношення вмісту елемента в коренях рослин до вмісту його рухомих форм у ґрунті [21; 22]. Результати експерименту обробляли статистично: розраховували помилку середнього арифметичного, обчислювали критерій достовірності відмінностей між показниками варіантів (t-test). Різницю вважали достовірною за $P < 0,05$.

Виклад основного матеріалу. Обговорюючи вміст рухомих форм важких металів у ґрунтах міста та їхній відсоток до валової форми, необхідно зазначити, що отримані результати є статистично достовірними для усіх ділянок, крім ділянки 5 із вмістом кадмію та ділянки 6 із вмістом нікелю (табл. 1). Серед металів першого класу небезпеки відсотковий вміст валової форми Zn пропорційно зростав від 10,5% в умовному контролі до 55,1% для територій із високим вмістом забруднення. Вміст рухомої форми цинку підвищувався на ділянках із високим рівнем забруднення від 5,5 до 16 разів порівняно із контролем. У цей діапазон потрапила ділянка 7, на якій перевищення цинку становило у понад 6 разів (табл. 1).

Серед інших металів першого класу не зафіксовано дисбалансу між пробними площадками за рівнями забруднення. Так, вміст Pb порівняно із контролем збільшився від 3 до 8,5 разів на площадках із помірним і незначним забрудненням та від 18 до 32 разів на площадках із високим рівнем. Отримані результати вмісту кадмію дещо знижені порівняно із контролем на ділянках 5-8, розташованих у зонах із незначним і помірним рівнями забруднення, а на ділянках із високим рівнем зафіксоване перевищення від 6 до 47 разів (табл. 1). Серед металів другого класу небезпеки на ділянках незначного та помірного рівнів забруднення спостерігалось

Вміст рухомих форм важких металів у ґрунті ($M \pm m, n = 3$)

Пробні площадки	Ni	Cu	Zn	Pb	Cd
1	10,93±0,05*	6,36±0,05*	39,49±1,42*	15,05±0,05*	2,52±0,15*
	80,6%	15,5%	55,1%	13,1%	35,4%
2	6,62±0,18*	18,01±0,55*	98,24±16,61*	19,88±0,24*	8,11±0,19*
	21,9%	17,6%	14,5%	14,6%	64,9%
3	8,39±0,22*	20,64±0,73*	63,92±0,49*	26,13±0,31*	12,17±0,20*
	24,5%	15,8%	25,5%	15,0%	42,6%
4	6,87±0,02*	6,38±0,22*	34,01±2,67*	25,5±0,60*	1,65±0,16*
	63,3%	22,3%	15,8%	26,0%	38,8%
5	6,82±0,32*	1,62±0,02*	33,23±0,38*	6,89±0,91*	0,35±0,01
	39,9%	9,5%	21,3%	25,3%	31,8%
6	2,29±0,11	2,84±0,70*	20,58±2,67*	3,37±0,88*	0,23±0,17*
	18,6%	14,6%	10,45%	5,9%	14,3%
7	4,34±0,17*	1,26±0,06*	16,66±0,90*	6,88±0,59*	0,15±0,01*
	41,7%	13,9%	25,9%	22,4%	27,8%
8	4,58±0,08*	1,37±0,12*	40,32±3,36*	2,47±0,65*	0,17±0,01*
	31,6%	9,4%	33,1%	12,3%	23,9%
9	1,44±0,03	0,56±0,06	6,17±0,44	0,82±0,04	0,26±0,04
	18,7	6,1	10,5	5,3	33,8

Примітка: чисельник – вміст рухомих форм елементу у ґрунтах, мг/кг ґрунту; знаменник – відношення рухомих форм до валових, %; * – різниця достовірна з контролем ($P < 0,05$)

збільшення їх вмісту порівняно з контролем від 2 до 5 разів, а на ділянках високого рівня забруднення – від 6 до 36 разів (табл. 1).

Серед відношень рухомих до валових форм важких металів спостерігалися значні коливання та відсутність чіткої градації між ділянками різних рівнів забруднення (табл. 1). Загальна техногенність досліджених рухомих форм важких металів для ділянок із високим і помірним рівнем забруднення утворює спадаючий ряд, який набуває такого вигляду: $Zn > Pb > Cu > Ni > Cd$. Однак зафіксована незначна різниця в накопиченні кадмію та нікелю на ділянці 4. Для пробних ділянок незначного рівня та умовного контролю ряд накопичення важких металів виглядає так: $Zn > Ni > Pb > Cu > Cd$ (табл. 1).

У наших попередніх дослідженнях було встановлено, що середній вміст гумусу в едафотобах Кривого Рогу знаходиться на рівні 1-4,5%. Найбільша кількість органічної речовини виявлена у ґрунтах Металургійного району, який характеризується високим рівнем забруднення. Це можна пояснити активними вторинними суцесійними процесами відновлення рослинного та ґрунтового покривів. З огляду на отримані результати вмісту різних форм важких металів і деяких буферних характеристик ґрунту [23], вважаємо за доцільне розглядати транслокаційні коефіцієнти, зокрема на прикладі синантропного виду *T. officinale*, з метою оцінки ступеню доступності мікроелементів у середовищі існування рослини та для подальшого використання показника як чутливого біоіндикатора їх вмісту.

Обговорюючи активне накопичення коренями нікелю, необхідно зазначити про чітку закономірність збільшення елементу удвічі на площадках високого рівня. Виключенням у цьому списку є площадка № 4, на якій зафіксована різниця більше ніж утричі порівняно із контролем. Площадки незначного та помірного рівнів характеризувалися тенденцією до збільшення нікелю в 1,5 рази порівняно із контролем. Однак на ділянці № 8 встановлено статистично достовірне зниження вмісту нікелю, яке становило $2,25 \pm 0,47$ мг/г (табл. 2).

На пробних площадках високого рівня забруднення зафіксовано перевищення купрумів в коренях рослин у 6 разів, а на ділянках 5 і 8 – до 15%. Виключенням є площадки 3 та 7, на яких зафіксовано незначне зниження порівняно із контролем. Необхідно зазначити, що ці дані є статистично не достовірними аналогічно з результатами по ділянці 6, хоча на цій ділянці рівень накопичення вищий, ніж у контролі (табл. 2).

Абсолютним лідером по накопиченню коренями був цинк. Спостерігалось закономірне збільшення та чітка відмінність у накопиченні коренями на площадках різного рівня забруднення. Так, максимальне накопичення від $75,10 \pm 0,018$ мг/г було встановлено на ділянці № 2 до $47,52 \pm 2,29$, що становило від 9,8 до 6,2 разів порівняно із контролем (табл. 2). На площадках помірного й незначного рівнів забруднення спостерігалось статистично закономірне збільшення накопичення металу удвічі.

Вміст важких металів у коренях *Taraxacum officinale* Wigg, мг/кг ґрунту та значення коефіцієнту транслокації в системі «ґрунт – корінь» (* – різниця достовірна з контролем, $P < 0,05$; $M \pm m$, $n = 3$)

Пробна площадка	Елемент	Корінь	Коефіцієнт варіації, %	Коефіцієнт транслокації елемента в системі «ґрунт – корінь»
1	Ni	5,70±0,67*	20,27	1,92
	Cu	2,49±0,06*	4,07	2,55
	Zn	52,83±1,04*	3,41	0,75
	Pb	3,14±0,22*	12,32	4,80
	Cd	8,03±0,39*	8,34	0,31
2	Ni	6,92±0,17*	4,24	1,04
	Cu	2,59±0,06*	3,94	6,94
	Zn	75,10±0,02*	0,41	2,15
	Pb	4,87±0,55*	19,61	4,08
	Cd	9,38±0,52*	9,68	0,86
3	Ni	8,86±0,39*	7,68	0,95
	Cu	2,92±0,50*	29,50	7,08
	Zn	70,58±5,06*	12,43	0,91
	Pb	4,81±0,33*	11,96	5,43
	Cd	7,67±0,06*	1,30	1,59
4	Ni	5,58±0,56*	17,47	1,23
	Cu	0,44±0,06	23,72	14,35
	Zn	47,52±2,29*	8,34	0,72
	Pb	3,62±0,22*	10,66	7,00
	Cd	8,14±0,02*	0,48	0,20
5	Ni	3,89±0,32*	14,43	1,75
	Cu	0,68±0,07*	18,32	2,37
	Zn	13,67±0,68*	8,58	2,43
	Pb	1,99±0,36	31,43	3,46
	Cd	2,31±0,22*	16,46	0,15
6	Ni	4,45±0,29*	11,23	0,83
	Cu	0,60±0,07	20,31	4,71
	Zn	12,02±1,47*	21,13	1,71
	Pb	1,76±0,29	28,32	1,96
	Cd	2,75±0,12*	7,66	0,08
7	Ni	2,25±0,47*	36,36	1,93
	Cu	0,63±0,06*	16,17	2,02
	Zn	16,54±1,10*	11,53	1,01
	Pb	1,48±0,14*	16,46	4,65
	Cd	2,11±0,30*	24,60	0,07
8	Ni	2,80±0,19	11,85	1,64
	Cu	0,46±0,04	13,17	2,97
	Zn	15,05±1,43*	16,51	2,68
	Pb	2,08±0,16*	12,99	1,19
	Cd	3,27±0,55*	29,01	0,05
9	Ni	2,44±0,23	16,17	0,59
	Cu	0,49±0,02	7,12	1,14
	Zn	7,66±0,12	2,81	0,81
	Pb	1,34±0,07	9,33	0,61
	Cd	1,08±0,09	12,91	0,24

Аналізуючи результати накопичення п्लомбуму в коренях *T. officinale*, необхідно зазначити, що фіксувалося чітке розмежування між територіями різного рівня забруднення. Максимальні значення зафіксовані на ділянці 2, що співвідносно перевищенню в 4 рази порівняно із контролем. Мінімальні значення для площадок із високим рівнем встановлені на ділянці 3, вони є статистично достовірними і утримують дані контролю (табл. 2). Експериментальні дані, отримані на площадках помірного рівня, мають незначне перевищення від контролю, але статистично вони не достовірні. Значення вмісту п्लомбуму з території незначного рівня забруднення мають перевищення в 1,5 рази від умовного контролю.

Подібно до нікелю, відбувалося активне накопичення коренями рослин кадмію (табл. 2). На площадках із високим рівнем забруднення зафіксоване збільшення накопичення у 8-9 разів порівняно із контролем (табл. 2). Ділянки помірного рівня характеризувалися статистично достовірним збільшенням накопичення металу від $2,31 \pm 0,02$ до $2,75 \pm 0,12$ мг/г. Території незначного рівня характеризувалися дещо відмінними показниками за накопиченням. Максимальне значення відповідає $3,27 \pm 0,55$ мг/г, що співвідносно перевищенню до контролю утричі. Отримані результати свідчать про значну акумуляцію іонів важких металів коренями *T. officinale*, що здебільшого пов'язано як із підвищеним вмістом зазначених елементів у пилових викидах підприємства, так і з певними особливостями процесів надходження іонів металів до рослин.

Наведені у табл. 2 результати визначення вмісту в коренях рослин нікелю, купруму, цинку, п्लомбуму та кадмію свідчать про здатність *T. officinale* до їхньої акумуляції. Логіку акумуляції мікроелементів можна відобразити у спадаючих рядах, які диференційовані за ступенем забруднення територій (табл. 3).

Для характеристики стану забруднення природного середовища доцільно визначати не лише рухомі форми забруднюючих речовин у ґрунті, а й коефіцієнт їх переходу у системі «ґрунт – рослина». З огляду на це були розраховані транслокаційні коефіцієнти для бар'єрного блоку «ґрунт – корені рослин». Міцний антиконцентраційний бар'єр як у контролі, так і за умов забруднення (транслокаційний коефіцієнт $<1,0$) притаманний лише для

кадмію. Однак на площадці 4 у рослин спостерігався мікроконцентраційний зв'язок (транслокаційний коефіцієнт >1). Для більшості пробних площадок транслокація п्लомбуму та купруму із ґрунту до коренів рослини відбувається безбар'єрним шляхом. Лише в умовному контролі зафіксований антиконцентраційний бар'єр.

Експериментальні результати дозволяють говорити про широке варіювання інтенсивності транслокації іонів цинку із ґрунту в корені. На ділянках із високим рівнем забруднення зафіксовано міцний бар'єр, окрім площадки 2, на якій зафіксовано показник із значенням 2,15 (табл. 2). Чіткого бар'єрного ефекту на територіях із помірним і незначним рівнями забруднення не зафіксовано, а для ділянки 9 значення коефіцієнту дорівнює 0,81, що свідчить про наявність ефективного бар'єрного механізму (табл. 2). Для нікелю інтенсивність транслокації із ґрунту до коренів практично однакова на всіх ділянках, окрім 9 та 6, на яких спостерігається бар'єрний ефект.

Визначено, що найменше накопичується коренями рослин Cu, який безбар'єрно пересувається із ґрунту, а міцний антиконцентраційний бар'єр як у контролі, так і за умов забруднення є лише для Cd. Оскільки накопичення кадмію в коренях займає не останнє місце, то можна припустити, що цей елемент потрапляє до рослин фоліарним шляхом.

Головні висновки. В умовах техногенного забруднення важкими металами екологічний фактор формування елементного складу рослин відіграє значну роль. За результатами виконаних досліджень можна дійти висновку, що процеси транслокації більшості важких металів до коренів *T. officinale* Wigg мають широке варіювання. Лідером накопичення як у ґрунті, так і в коренях рослин є цинк, який надходить до вегетативних органів безбар'єрним шляхом. Для кадмію зафіксовано наявність високого бар'єрного ефекту у системах «ґрунт – корінь».

Перспективи використання результатів дослідження. Наявність зв'язку між накопиченням важких металів у ґрунті та коренях рослин дозволяє використовувати *T. officinale* Wigg для здійснення біоіндикації довкілля. Вважаємо за необхідне подальше детальне дослідження адаптивних реакцій кульбаби лікарської з метою створення біоіндикаційних шкал.

Таблиця 3

Ряди накопичення важких металів у коренях *T. officinale*

Пробна площадка	Ряди накопичення важких металів	Пробна площадка	Ряди накопичення важких металів
1	Zn>Cd>Ni>Pb>Cu	6	Zn>Ni>Cd>Pb>Cu
2	Zn>Cd>Ni>Pb>Cu	7	Zn>Ni>Cd>Pb>Cu
3	Zn>Cd>Cu>Ni=Pb	8	Zn>Cd>Ni>Pb>Cu
4	Zn>Ni>Cd>Pb>Cu	9	Zn>Ni>Pb>Cd>Cu
5	Zn>Ni>Cd>Pb>Cu		

Література

1. Wuana R.A., Okieimen F.E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *Isrn Ecology*.
2. Aminiyan M.M., Aminiyan F.M., Mousavi R., Heydariyan A. (2016). Heavy metal pollution affected by human activities and different land-use in urban topsoil: a case study in Rafsanjan city, Kerman province, Iran. *Eurasian Journal of Soil Science*, 5 (2), 97.
3. Ali H., Khan E., Sajad M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals-concepts and applications. *Chemosphere*, 91 (7), 869–881.
4. Tangahu B.V., Sheikh Abdullah S.R., Basri H., Idris M., Anuar N., Mukhlisin M. (2011). A Review on heavy metals (As, Pb and Hg) uptake by plants through phytoremediation. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011.
5. Minkina T.M., Mandzhieva S.S., Chaplygin V.A., Bauer T.V., Burachevskaya M.V., Nevidomskaya D.G., Zamulina I.V. (2017). Content and distribution of heavy metals in herbaceous plants under the effect of industrial aerosol emissions. *Journal of Geochemical Exploration*, 174, 113–120.
6. Fujimaki S., Suzui N., Ishioka N.S. et al. (2010). Tracing cadmium from culture to spikelet: noninvasive imaging and quantitative characterization of absorption, transport and accumulation of cadmium in an intact rice plant. *Plant Physiol*, 152, 1796–1806.
7. Dias M.C., Monteiro C., Moutinho-Pereira J. et al. (2013). Cadmium toxicity affects photosynthesis and plant growth at different levels. *Acta Physiol. Plant*, 35, 1281–1289.
8. Hall J.L., Williams L.E. (2003). Transition metal transporters in plants. *Ibid*, 54 (393), 26101–26113.
9. Hänsch R., Mendel R.R. (2009). Physiological functions of mineral micronutrients (Cu, Zn, Mn, Fe, Ni, Mo, B, Cl). *Curr. Opin. Plant Biol*, 12, 259–266.
10. Wodala B., Eitel G., Gyula T.N. et al. (2012). Monitoring moderate Cu and Cd toxicity by chlorophyll fluorescence and P 700 absorbance in pea leaves. *Photosynthetica*, 50 (3), 380–386.
11. Pence N.S., Larsen P.B., Ebbs S.D., Letham D.L., Lasat M.M., Garvin D.F., Kochian L.V. (2000). The molecular physiology of heavy metal transport in the Zn / Cd hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(9), 4956–4960.
12. Hossian M.A., Piyatida P., da Silva J.A.T., Fujita M. (2012). Molecular mechanism of heavy metal toxicity and tolerance in plants: central role of glutathione in detoxification of reactive oxygen species and methylglyoxal and in heavy metal chelation. *J. Bot.* Article ID 872875, 37.
13. Rascio N., Navari-Izzo F. (2011). Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? And what makes them so interesting? *Plant science*, 180(2), 169–181.
14. Juknys R., Vitkauskaitė G., Račaitė M., Vencloviėnė J. (2012). The impacts of heavy metals on oxidative stress and growth of Spring Barley. *Cent. Eur. J. Bot*, 7 (2), 299–306.
15. Radulescu C. et al. (2013). Heavy metal accumulation and translocation in different parts of *Brassica oleracea* L. *Romanian Journal of Physics.*, 58 (9-10), 1337–1354.
16. Stratu A., Costica N., Costica M. (2007). Wooden species in the urban green areas and their role in improving the quality of the environment. *Present Environment and Sustainable Development*, 10(2), 173–184.
17. Bessonova V.P., Kryvoruchko A.P. (2017). Changes in the structural indices of annual shoots of *Quercus rubra* under anthropogenic impact. *Biosystems Diversity*, 25 (3), 191–196.
18. Zupan M., Kralj T., Greman H., Hudnik V., Lobnik F. (2003). The accumulation of Cd, Zn, Pb in *Taraxacum officinale* and *Plantago lanceolata* from contaminated soils. *Proc VII ICOBTE, Uppsala Sv*.
19. Практикум по почвоведению / под ред. И.С. Кауричева. Москва : Агропромиздат, 1986.
20. Методические указания по определению тяжелых металлов в почвах сельхозугодий и продукции растениеводства. Москва : ЦИНАО, 1989.
21. Barman S.C., Sahu R.K., Bhargava S.K., Chatterjee C. (2000). Distribution of heavy metals in wheat, mustard and weed grains irrigated with industrial effluents. *Bull. Environ. Conta. Toxicol*, 64 (4), 489–496.
22. Gupta S., Nayek S., Saha R.N. Satpati. (2008). Assessment of heavy metal accumulation in macrophyte, agricultural soil and crop plants adjacent to discharge zone of sponge iron factory. *J. of Environ. Geol*, 55 (4), 731–739.
23. Silich I.O. (2015). Buffer properties as index of edaphotope heavy metal pollution of Kryvyi Rih urban ecosystems // *Agroecological journal : NAAS Institute of Agroecology and Environmental Management*, 4, 34–44.