

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ ЗАБРУДНЕННЯ СПОЛУКАМИ РВ ҐРУНТІВ УРБОЕКОСИСТЕМ: НА ПРИКЛАДІ М. ДНІПРО

Яковишина Т.Ф.

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури
вул. Архітектора Олега Петрова, 24А, м. Дніпро
t_yakovyshyna@ukr.net

Потреба оцінювання вмісту Рв в ґрунтах урбоєкосистем зумовлена особливостями екологічної ситуації, що ускладнюється внаслідок збільшення техногенних навантажень на складові навколишнього природного середовища, та усвідомленням ступеня небезпеки, котрий спричиняє цей хімічний елемент. Актуальним науково-практичним завданням є встановлення показника оцінювання інтенсивності забруднення ґрунтів урбоєкосистем сполуками металів з врахуванням урбанізованого фону, наявності окремих осередків інтенсивного забруднення – hot spots та міграційної здатності сполук металів в ґрунті. Дослідження проводились на прикладі забруднення урбоєкосистеми м. Дніпро небезпечними сполуками свинцю. Валовий вміст свинцю в ґрунті визначали після його кислотної обробки на атомно-абсорбційному спектрофотометрі, рухомі форми у витягу ААБ з рН 4,8, потенційно-рухомі форми у витягу 1Н НСІ. Як показали результати досліджень інтенсивність забруднення ґрунту урбоєкосистеми м. Дніпро небезпечними сполуками свинцю коливалась від помірної до сильної за валовим вмістом та була сильною за потенційно-рухомими та рухомими формами. Міграційна здатність сполук свинцю зумовлювалась підвищенням його валового вмісту на тлі втрати буферної властивості міським ґрунтом. Виявлено тенденцію зростання значень індексу забруднення Немерова (NPI) в ряді валовий вміст < потенційно-рухомі форми < рухомі форми внаслідок врахування здатності сполук свинцю до мігрування. Ґрунтовно доведено ефективність використання NPI на відміну від коефіцієнту концентрації та коефіцієнту небезпеки, як такого, що зважає на особливості формування і функціонування урбоєкосистем, а саме, строкатість та просторове розповсюдження забруднення, а також здатність небезпечних сполук металів до мігрування. Запропоновано залучення NPI до блоку оцінювання системи моніторингу стану урбоєкосистем. *Ключові слова:* метали, свинець, небезпечні сполуки, забруднення, індекс забруднення Немерова, ґрунт, урбоєкосистема.

Assessment features of pollution by Pb compounds of urboecosystem soils: on the example of Dnipro city. Yakovyshyna T.

The need to assess the Pb content in the urban ecosystems soils is due to the peculiarities of the ecological situation, which is complicated by the increase of man-made loads to the environment components, and the awareness of the danger degree by this chemical element. An urgent scientific and practical task is to establish an indicator for assessing the pollution intensity of urboecosystems soil by the metal compounds, taking into account the urbanized background, the presence hot spots of pollution in the individual centers, and the mobility of metal compounds in the soil. The research was conducted on the example of urban ecosystem contamination of Dnipro city by the dangerous lead compounds. The gross content of lead in the soil was determined after its acid treatment on an atomic absorption spectrophotometer, available forms in the extract of AAB with pH 4.8, potentially available forms in the extract of 1N HCl. As the research results showed, the intensity of soil contamination of the urban ecosystem Dnipro by the dangerous lead compounds ranged from moderate to severe in terms of gross content and was severe in terms of potentially available and available forms. The migration ability of lead compounds was caused by an increase in its gross content and loss of the buffering properties by the urban soil. An increasing trend of Nemerov pollution index (NPI) values has been determined in the series gross content < potentially mobile forms < mobile forms into account the lead compounds ability to migration. In contrast to the concentration coefficient and the hazard coefficient, the effectiveness of NPI using has been thoroughly proven, as it takes into account the peculiarities of the urboecosystems formation and functioning, namely, the variegation and spatial distribution of pollution and ability of dangerous metal compounds to migration. NPI has been proposed to involve to the evaluation block of the monitoring system of the state of urboecosystems. *Key words:* metals, lead, hazardous compounds, pollution, Nemerov pollution index, soil, urban ecosystem.

Постановка проблеми. Необхідність оцінки вмісту Рв в ґрунтах урбоєкосистем пов'язана не тільки з екологічною ситуацією, що ускладнюється внаслідок збільшення техногенних навантажень на складові навколишнього природного середовища, а й з усвідомленням ступеня небезпеки, котрий спричиняє цей хімічний елемент. Небезпека забруднення Рв зумовлюється надто високою токсичністю даного металу для біоти, і, в першу чергу, для людини, за умов тривалої відсутності вираженої симптоматики інтоксикації свинцем при наявності функціональних та органічних ушкоджень в органах та їх системах, багато з яких можуть бути незворотними. Навіть в незначних концентраціях Рв спричиняє токсичний,

мутагенний та канцерогенний ефекти, має здатність до біокумуляції й досить погано видаляється з екосистем. Рв – елемент першого класу токсичності, що призводить до порушень у нервовій системі, крові та судинах, знижує резистентність імунного статусу, а також активно впливає на синтез білку, енергетичний баланс клітини та її генетичний апарат [1]. Хронічне отруєння Рв досить різноманітне за клінічними проявами, так він вражає центральну й периферичну нервову систему, кістковий мозок, кров, нирки, судини, генетичний апарат клітини, здійснює ембріотоксичну дію, викликає сатурнізм [1–3]. Таким чином, визначення джерел і просторового розподілу сполук свинцю в ґрунтах техногенно

навантажених урбоекосистем, має велике значення щодо оцінювання інтенсивності спричиненого забруднення для забезпечення екологічної безпеки міського населення.

Актуальність дослідження. Особливості формування поелементного забруднення небезпечними сполуками металів в межах урбоекосистеми сприяють утворенню локальних ділянок різкого підвищення їх концентрації та тлі досить рівномірного вмісту, проте вище фонових значень. Показники, що використовуються для визначення екологічної безпеки поелементного забруднення ґрунту сполуками металів – коефіцієнт концентрації та коефіцієнт безпеки зазначені особливості не враховують. Крім того, при проведенні оцінювання забруднення ґрунтів техногенно навантажених урбоекосистем небезпечними сполуками металів, зазвичай, обмежуються використанням тільки їх валового вмісту після кислотної обробки ґрунту, проте за умов порушення буферної здатності внаслідок впливу антропогенної діяльності цей показник не буде інформативним, адже здатність сполук металів до мігрування, що відбивається через їх рухомість, може збільшуватися на порядок порівняно до зонального ґрунту, який знаходиться в нативних умовах. Тому досить важливо встановити показник оцінювання інтенсивності поелементного забруднення ґрунтів урбоекосистем сполуками металів, який би, по-перше, враховував сформований урбанізований фон та наявність окремих осередків інтенсивного забруднення – hot spots, а, по-друге, зважав на рухомість сполук металів в ґрунті, тобто визначався для рухомих та потенційно-рухомих їх форм.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження проведено у рамках реалізації Закону України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 28.02.2019 р. під час виконання у Придніпровській державній академії будівництва та архітектури НДР «Екологічний моніторинг складових техногенно навантажених урбоекосистем» (державний реєстраційний номер 0116U004746, 2016–2020 рр.) та «Наукові основи забезпечення екологічної безпеки техногенно навантажених урбоекосистем» (державний реєстраційний номер 0121U10039120, 2021–2023 рр.).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При проведенні оцінювання техногенного навантаження на ґрунти урбоекосистем внаслідок їх поелементного забруднення сполуками металів перевагу надають коефіцієнту концентрації. Методологічний підхід ґрунтується на співвіднесенні результатів аналітичних досліджень вмісту катіонів металів в конкретному зразку ґрунту з вище запропонованими еталонами, в результаті чого встановлюється факт забруднення за умов перевищення природної флуктуації згідно фонові концентрації.

Світова спільнота при нормуванні забруднення металами здебільшого спирається на їх вміст в зональному ґрунті, тобто на природний геохімічний фон, котрий вчені трактують по-різному: середньоарифметичне, середньгеометричне або навіть модальне значення концентрації [4]. Проте слід досить обережно використовувати середні значення в якості фонові концентрації, вважається за доцільне супроводжувати даний показник оцінкою варіації аналітичних даних. Зарубіжні вчені пропонують фонові концентрації катіонів металів визначати в межах підтипу ґрунтів з урахуванням фаціальних відмінностей [5–6], такі концентрації трактуються як середній вміст. Для основних типів ґрунтів України концентрації природного геохімічного фону згідно зазначених вимог були встановлені вченими Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського». Для міських ґрунтів інтенсивність поелементного забруднення сполуками металів встановлюється не тільки за перевищенням природного геохімічного фону, а й з урахуванням розповсюдження забруднення на досліджуваній території. Крім того за умов техногенного забруднення території міст слід зважати на вже сформований урбанізований геохімічний фон та враховувати наявність осередків інтенсивного забруднення, так звані hot spots. Останнім часом все більш активно використовують індекс забруднення Немерова (Nemerov pollution index, NPI), адже він враховує середнє значення та найвище значення забруднення сполуками металу, що, в свою чергу, відбиває всю небезпеку ситуації, яка склалася в межах техногенно навантаженої урбоекосистеми [7–8].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Проблема дослідження полягає в обґрунтування використання NPI для оцінювання інтенсивності забруднення ґрунтів урбоекосистем, як такого що враховує здатність небезпечних сполук металів до мігрування та особливості просторового розповсюдження забруднення, а саме, урбанізований фон і наявність hot spots.

Новизна. Визначено інтенсивність забруднення ґрунту сполуками свінцю за NPI для урбоекосистеми м. Дніпро з урахуванням їх здатності до мігрування. Набуло подальшого розвитку застосування NPI для оцінювання інтенсивності забруднення небезпечними сполуками металів ґрунтів техногенно навантажених урбоекосистем з урахуванням їх ґрунтових особливостей, а саме, формування умов щодо підвищення здатності небезпечних сполук металів до мігрування, утворення урбанізованого фону і наявність hot spots.

Методологічне або загальнонаукове значення. Для ефективності використання NPI щодо оцінювання поелементного забруднення урбоекосистеми м. Дніпро на прикладі свінцю було створено мережу

ключових ділянок відбору проб ґрунту, в загальній кількості 65, шляхом нанесення на територію міста сітки розміром 2 км × 2 км. Розміри сітки визначались площею та кількістю населення міста [9].

Валовий вміст свинцю в ґрунті визначали після його кислотної обробки на атомно-абсорбційному спектрофотометрі, рухомі форми, що показували здатність сполук металів до мігрування – у витягу ААБ з рН 4,8, потенційно-рухомі форми для врахування впливу урбоєкосистеми на процес мігрування – у витягу 1Н НСІ. Аналіз виборок вмісту сполук свинцю з різною здатністю до мігрування здійснювали методами математичної статистики.

Забруднення ґрунту сполуками свинцю з урахуванням їх здатності до мігрування оцінювали за допомогою NPI (1) [10]:

$$NPI = \sqrt{\frac{P_{ave}^2 + P_{max}^2}{2}} \quad (1)$$

де P_{max} – максимальне значення індексу забруднення ґрунту сполуками металу; P_{ave} – середнє значення індексу забруднення ґрунту сполуками металу, що розраховується за формулою (2)

$$P_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{S_i} C_i \quad (2)$$

C_i – вміст катіонів металу в досліджуваному ґрунті (мг/кг); S_i – фоновий вміст катіонів металу в зональному ґрунті (мг/кг); n – кількість досліджуваних зразків.

Оцінювання інтенсивності забруднення небезпечними сполуками свинцю згідно одержаних значень NPI виконували, користуючись шкалою, наведеною в табл. 1.

Таблиця 1

Шкала інтенсивності забруднення ґрунту сполуками металу за NPI [11]

Значення NPI	Інтенсивність забруднення ґрунту
$NPI \leq 0,7$	Чистий ґрунт
$0,7 < NPI \leq 1,0$	Межа виникнення небезпеки забруднення ґрунту
$1,0 < NPI \leq 2,0$	Слабке забруднення ґрунту
$2,0 < NPI \leq 3,0$	Помірне забруднення ґрунту
$NPI > 3,0$	Сильне забруднення ґрунту

Викладення основного матеріалу. Сполуки Рb потрапляють до ґрунту з викидами металургійних, металооброблювальних, машинобудівних та хімічних підприємств [1] в загальній кількості 12 стосовно м. Дніпро. Щорічно від стаціонарних джерел в атмосферне повітря надходить близько 1,972 т сполук Рb, що відповідає техногенному навантаженню: 0,005 т на 1 км² площі урбоєкосистеми та 0,002 кг – на душу населення відповідно (дані Головного управління статистики в Дніпропетровській області).

На території міста урбанізований фон складає для вмісту катіонів Рb²⁺ після кислотної

обробки – 65,86 мг/кг, що більше за природній, притаманний зональному ґрунту – чорнозему звичайному, в 2,94 рази, а за ГДК – в 2,20 рази, а для вилучених за допомогою ААБ з рН 4,8 – 18,11 мг/кг, відповідно 9,06 та 181,11 рази. Вміст катіонів Рb²⁺ (витяг 1Н НСІ) становить до 99% від їх кількості після кислотної обробки, що свідчить про втрату буферних властивостей антропогенно трансформованим ґрунтом внаслідок зменшення вмісту органічної речовини та R₂O₅, підкислення, диспергації ґрунтових колоїдів, каменястості, тощо. Концентрація катіонів свинцю вилучених ААБ з рН 4,8 також є досить високою – до 63% від вмісту після кислотної обробки ґрунту, отже спричиняє токсичність для рослин та позначається на збідненості фітоценозів. На території міста існують ділянки де майже повністю відсутній рослинний покрив. Більш тісний кореляційний зв'язок та достовірність апроксимації рівнянь регресії були зафіксовані між вмістом катіонів Рb²⁺ після кислотної обробки і вилучених за допомогою витягу 1Н НСІ (0,962), порівняно з вмістом одержаним з використанням ААБ з рН 4,8 (0,902), що ще раз підтверджує їх доцільність при визначенні здатності до мігрування для характеристики антропогенного забруднення ґрунтів урбоєкосистем сполуками екологічно небезпечних металів в умовах інтенсивного техногенного навантаження (формули 3–5).

$$\begin{aligned} \text{Сп.-р.ф.}_{\text{Рb}} &= -0,0000006\text{Св.}_{\text{Рb}}^3 + 0,0009\text{Св.}_{\text{Рb}}^2 + \\ &0,5663\text{Св.}_{\text{Рb}} + 4,9997, \\ R^2 &= 0,930 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Ср.ф.}_{\text{Рb}} &= -0,0000003\text{Св.}_{\text{Рb}}^3 + 0,00005\text{Св.}_{\text{Рb}}^2 + \\ &0,2506\text{Св.}_{\text{Рb}} + 2,0928, \\ R^2 &= 0,815 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{Ср.ф.}_{\text{Рb}} &= 0,000002\text{Сп.-р.ф.}_{\text{Рb}}^3 - 0,0019\text{Сп.-р.ф.}_{\text{Рb}}^2 + \\ &0,6575\text{Сп.-р.ф.}_{\text{Рb}} - 4,3449, \\ R^2 &= 0,721 \end{aligned} \quad (5)$$

де Св. – вміст катіонів металу після кислотної обробки (валовий вміст); Сп.-р.ф. – вміст катіонів металу у витязі 1Н НСІ (потенційно-рухомі форми); Ср.ф. – вміст катіонів металу у витязі ААБ з рН 4,8 (рухомі форми).

Як показали результати аналізу проведеного методами математичної статистики, перевищення медіани середнім значенням відбиває тенденцію до збільшення площі ареалів техногенного навантаження на міський ґрунт через забруднення сполуками Рb (табл. 2). Значний розмах між максимальним і мінімальним значенням зумовлений строкатістю, котра спричинена процесами деконцентрації при розбудові урбоєкосистеми та тривалого забруднення в промислових зонах. Позитивні значення коефіцієнту ексцесу концентрацій катіонів свинцю, одержаних у різних витягах обумовлювали наявність гостровершинного розподілення кожної

Таблиця 2

Характеристика вмісту катіонів Pb²⁺ у ґрунтах урбоєкосистеми м. Дніпро

Показник	Вміст катіонів металу, що вилучаються із сполук		
	шляхом кислотної обробки, мг/кг	за допомогою витягу 1 Н НСІ, мг/кг	за допомогою витягу ААБ з рН 4,8, мг/кг
Мінімум	6,74	3,67	1,69
Максимум	429,67	360,64	126,00
Середнє	65,86	51,17	18,11
Медіана	37,00	26,18	11,20
Екссес	7,70	9,96	10,49
Асиметрія	2,90	3,25	3,17
Дисперсія	8100,11	6009,87	524,15
Стандартне відхилення	90,70	78,13	23,07
Розмах	422,93	356,97	124,31

із виборок, що за умов незначної правосторонньої асиметрії (< 5,5) за В.В. Тарасовою (2008) [12] свідчило про інтенсивне антропогенне забруднення ґрунтів свинцем на всій території м. Дніпро з окремими hot spots.

Інтенсивність забруднення ґрунту небезпечними сполуками свинцю була вища та більш монотонна на правобережній частині урбоєкосистеми м. Дніпро, чим на лівобережжі, де спостерігалась значна строкатість вмісту Pb особливо в Амур-Нижньодніпровському районі між промисловими територіями Амур-Гавані та приватним сектором (табл. 3). Найбільш безпечним районом як на правобережжі, так і відносно всієї території міста виявився Соборний район, на території якого відсутні промислові підприємства – забруднювачі навколишнього середовища небезпечними сполуками металів, а спостерігається тільки вплив анотранспорту. Згідно значень NPI забруднення ґрунтів урбоєкосистеми сполуками свинцю по Індустріальному та Соборному районам було помірно інтенсивним, а в решті районів – сильним за валовим вмістом. При врахуванні здатності до мігрування категорія інтен-

сивності забруднення змінювалася і була сильною по всім районам м. Дніпро.

Спостерігалася тенденція зростання значень NPI в ряді валовий вміст < потенційно-рухомі форми < рухомі форми, що, в свою чергу свідчило, про підвищення екологічної небезпеки внаслідок забруднення при збільшенні рухомості сполук Pb в ґрунті. Зазвичай в нативних умовах в зональному ґрунті – чорноземі звичайному міграційна здатність сполук свинцю досить низька, вміст рухомих форм становить 0,4–0,5%. Проте наявність потенційно-рухомих форм у зонального ґрунту може складати до 50% від валу, що зумовлює потенційну здатність до мігрування при зміні ґрунтових умов в процесі розбудови та функціонуванні урбоєкосистем. Саме тому не слід при оцінюванні забруднення сполуками металу зупинятися тільки на валовому вмісті, а потрібно також відслідкувати небезпеку щодо здатності його сполук до мігрування в урбанізованих умовах.

Використання показника NPI для оцінки інтенсивності забруднення ґрунтів урбоєкосистем сполуками металів надало змогу оцінити небезпеку з урахуванням строкатості та просторого розповсю-

Таблиця 3

Інтенсивність забруднення ґрунтів урбоєкосистеми м. Дніпро небезпечними сполуками свинцю за NPI

Адміністративна одиниця	Форми свинцю в ґрунті		
	валові	потенційно-рухомі	рухомі
Амур-Нижньодніпровський район	12,26	17,96	718,77
Індустріальний район	2,76	2,78	119,41
Новокодацький район	10,22	15,63	911,82
Самарський район	5,26	4,52	215,15
Соборний район	1,76	2,27	102,03
Центральний район	12,39	17,83	544,12
Чечелівський район	5,48	6,43	285,07
Шевченківський район	13,86	16,46	673,24
Лівобережжя	12,21	17,88	716,32
Правобережжя	13,76	18,06	902,85
м. Дніпро	13,72	18,01	900,11

дження, що досить чітко відстежувалось по Амур-Нижньодніпровському та Новокодацькому районам, де врахування hot spots позначалось на суттєвому збільшенні значення NPI, а в Самарському призводило до зміни категорії забруднення. На відміну від оцінювання забруднення ґрунту за допомогою коефіцієнту концентрації та коефіцієнту небезпеки, інформація надана NPI є більш компактною та повною, адже включає наявний урбанізований фон за середнім значенням та максимальний вміст сполук металу, зафіксований на досліджуємії території, в нашому випадку по районам і місту, а не поодинокі на окремих ключових ділянках відбору проб.

Головні висновки. Визначено інтенсивність забруднення ґрунту урбоєкосистеми м. Дніпро небезпечними сполуками свинцю за допомогою NPI, яка коливалась від помірної до сильної за валовим вмістом та була сильною за потенційно-рухомими та рухомими формами. Методами математичної статистики встановлено, що міграційна здатність сполук

свинцю зумовлювалась підвищенням його валового вмісту на тлі втрати буферної властивості міським ґрунтом. Виявлено тенденцію зростання значень NPI в ряді валовий вміст < потенційно-рухомі форми < рухомі форми внаслідок врахування здатності сполук свинцю до мігрування. Ґрунтовно доведено ефективність використання NPI на відміну від коефіцієнту концентрації та коефіцієнту небезпеки, як такого, що зважає на особливості формування і функціонування урбоєкосистем, а саме, строкатість та просторове розповсюдження забруднення, а також здатність небезпечних сполук металів до мігрування.

Перспективи використання результатів дослідження. Результати досліджень можуть бути використані для обґрунтування залучення NPI до блоку оцінювання системи моніторингу стану урбоєкосистем, що дасть змогу визначати екологічну небезпеку з урахуванням здатності до мігрування сполук металів, сформованого урбанізованого фону та максимального рівня забруднення в hot spots.

Література

1. Nieboer, E., Tsuji, L. J., Martin, I. D., Liberda, E. N. Human biomonitoring issues related to lead exposure. *Environmental Science Processes and Impacts*. 2013. Vol. 15. P. 1824–1829.
2. Ekong, E. B., Jaar, B., Weaver, V. Lead-related nephrotoxicity: A review of the epidemiologic evidence. *Kidney International*. 2006. Vol. 70. P. 2074–2084. doi: 10.1038/sj.ki.5001809
3. Navas-Acien, A., Guallar, E., Silbergeld, E. K., Rothenberg, S. J. Lead exposure and cardiovascular disease – A systematic review. *Environmental Health Perspective*. 2007. Vol. 115. P. 472–482. doi: 10.1289/ehp.9785
4. Яковичина Т. Ф. Розвиток наукових основ удосконалення системи моніторингу мігрування небезпечних сполук металів в ґрунтах урбоєкосистем. дис. док. техн. наук: 21.06.01. Дніпро, 2019. 479 с.
5. Ghazaryan K. A., Gevorgyan G. A., Movsesyan H. S., Ghazaryan N. P., Grigoryan K. V. The evaluation of the heavy metal pollution degree in the soil around the Zangzur copper and molibdenum combine. *International journal of environmental, chemical, ecological, geological and geophysical engineering*. 2015. Vol. 5. P. 405–410.
6. Tomlinson D. L., Wilson J. G., Harris C. R., Jeffrey D. W. Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. *Helgolander Meeresunter*. 1980. Vol. 33. P. 566–575.
7. Guan, Y., Shao, C., Ju, M. Heavy metal contamination assessment and partition for industrial and mining gathering areas. *International journal of environmental research and public health*. 2014. Vol. 11. P. 7286–7303.
8. Kowalska, J., Mazurek, R., Gasiorek, M., Setlak, M., Zaleski, T., Waroszewski, J. Soil pollution indices conditioned by medieval metallurgical activity – a case study from Krakow (Poland). *Environmental Pollution*. 2016. Vol. 218. P. 1023–1036.
9. Балюк С. А., Фатєєв А. І., Мірошніченко М. М. Ґрунтово-геохімічне обстеження урбанізованих територій. Харків : ННЦ «ІГА ім. О.Н. Соколовського» УААН, 2004. 54 с.
10. Li R., Yuan Y., Li C., Sun W., Yang M., Wang X. Environmental health and ecological risk assessment of soil heavy metal pollution in the coastal cities of Estuarine Bay – a case study of Hangzhou Bay, China. *Toxics*. 2020. Vol. 8(75). doi:10.3390/toxics8030075
11. Zhu, G., Guo, Q., Xiao, H.-Y., Chen, T., Yang, J. Multivariate statistical and lead isotopic analyses approach to identify heavy metal sources in topsoil from the industrial zone of Beijing Capital Iron and Steel Factory. *Environmental science and pollution research*. 2017. Vol. 24. P. 14877–14888.
12. Тарасова В. В. Екологічна статистика. Київ: Центр учбової літератури, 2008. 392 с.