СКРИНІНГ ВМІСТУ ДЕЯКИХ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ГУМУСОВОМУ ГРУНТОВОМУ ГОРИЗОНТІ ЗАКАРПАТСЬКОЇ ОБЛАСТІ

С. М. Сухарев*, Л. М. Бугина, О. В. Паллаг, О. Ю. Сухарева, В. Г. Дробнич, Н. В. Бойко

Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет», вул. Підгірна, 46, Ужгород 88000, Україна

*e-mail: serhii.sukharev@uzhnu.edu.ua

На основі проведення скринінгу вмісту деяких важких металів (ВМ) у гумусовому ґрунтовому горизонті Закарпатської області встановлено закономірності розподілу ВМ у ґрунтах різних ландшафтних зон. Показано, що зі збільшенням висоти місцевості вміст ВМ у ґрунтах зменшується (крім Mn і Hg) і для валового вмісту ВМ значення коефіцієнту кореляції Спірмена становить: Cu – (-0,84); Zn – (-0,83); Mn – 0,77; Mo – (-0,91); Co – (-0,82); Pb – (-0,83); Hg – немає; для вмісту кислоторозчинних форм: Cu – немає; Zn – (-0,72); Mn – 0,75; Mo – (-0,89); Co – (-0,86); Pb – (-0,77); Hg – немає. Така закономірність пов'язана з тектонічними і геологічними особливостями територій різних ландшафтних зон. Розрахунок міграційного показника для ВМ (відношення вмісту кислоторозчинних форм до валового вмісту) показало, що у гірських районах цей показник є найвищим для Zn, Pb і Cu, що свідчить про потенційну небезпеку міграції цих ВМ у об'єктах довкілля та їхню біодоступність. Це пов'язано, вочевидь, із типом ґрунтів гірських районів області. Встановлено виражену міжелементну кореляцію вмісту ВМ у ґрунтах (крім Hg) і відповідні значення коефіцієнтів Пірсона для валового вмісту ВМ становлять: Cu:Zn – 0,96; Cu:Mn – (-0,84); Cu:Mo – 0,89; Cu:Co – 0,99; Cu:Pb – 0,87; Zn:Mn – (-0,79); Zn:Mo – 0,91; Zn:Co – 0,96; Zn:Pb – 0,86; Mn:Mo – (-0,86); Mn:Co – (-0,84); Mn:Pb – (-0,75); Mo:Co – 0,87; Mo:Pb – 0,81; Co:Pb – 0,87. Це дозволяє прогнозувати вміст кількох ВМ у ґрунтах Закарпатської області на основі результатів визначення одного з них. Загалом вміст ВМ у гумусовому ґрунтовому горизонті (валовий вміст та вміст рухомих форм) є нижчим, ніж відповідні значення гранично допустимих концентрацій.

Ключові слова: ґрунти; геохімічні особливості; валовий вміст; кислоторозчинна форма; міграційний коефіцієнт.

ВСТУП. Ґрунти належать до акумулюючих природних об'єктів, але при цьому є основним засобом виробництва у сільсько-му господарстві. Серед екополютантів, які можуть знаходитися у ґрунтах, особливої уваги заслуговують важкі метали (ВМ) з огляду на свою високу токсичність і відносну мобільність [1–4]. Високий вміст ВМ у ґрунтах може сприяти накопиченню їх у рослинній продукції та негативно впливати на стан здоров'я людини [5–10]. Вміст ВМ у ґрунтах може бути зумовлений як природними факторами, зокрема геохімічними умовами територій, так і впливом антропогенних факторів через забруднення об'єктів довкілля [11–13]. Тому контроль вмісту ВМ у ґрунтах є актуальним завданням моніторингових досліджень, причому особливу увагу приділяють гумусовому ґрунтовому горизонту. Деякі з ВМ слід розглядати і як мікроелементи, які можуть впливати на мікроелементний склад підземних і поверхневих вод [14], а також рослинного покриву.

Закарпатська область має виражену геологічну і тектонічну зональність (перепад висот становить до 2000 м), що зумовлює вплив геохімічних факторів на вміст ВМ в об'єктах довкілля [14]. Своєю чергою, вміст ВМ може суттєво відрізнятися для різних ландшафтних зон Закарпаття. Тому метою цієї роботи є скринінг вмісту ВМ у гумусовому ґрунтовому горизонті (Н) Закарпатської області. Скринінг проводили за показниками валового вмісту ВМ та вмісту кислоторозчинних форм.

ЕКСПЕРИМЕНТ І ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ. Дослідження проведено у 2018 році. Відбір проб ґрунтів здійснювали для всіх районів Закарпатської області, а це: гірські райони (Рахівський,

Міжгірський, Воловецький); передгірські райони (Свалявський, Іршавський, Хустський, Тячівський, Перечинський, Великоберезнянський); низовинні райони (Берегівський, Виноградівський, Мукачівський, Ужгородський).

Як ми уже зазначали, для кожної досліджуваної території є характерними тектонічні та геологічні особливості, які представлено на рис. 1.

Рис. 1. Фрагмент тектонічної карти Українських Карпат (Закарпатська область) [14]. Досліджувані території (райони): 1 – Рахівський; 2 – Міжгірський; 3 – Воловецький; 4 – Свалявський; 5 – Тячівський; 6 – Великоберезнянський; 7 – Перечинський; 8 – Іршавський; 9 – Хустський; 10 – Ужгородський; 11 – Мукачівський; 12 – Берегівський; 13 – Виноградівський.

Відбір проб ґрунтів (гумусовий горизонт) проводили з урахуванням вимог ДСТУ 4287:2004, ДСТУ ISO 10381-1:2004 – ДСТУ ISO 10381-4:2005 та ДСТУ ISO 10381-5:2009. Для кожного району відбирали 10 проб ґрунтів (методом конверта, з урахуванням площі території та геологічних особливостей), змішували проби і скорочували з одержанням єдиної усередненої проби.

Підготовку проб ґрунтів проводили з урахуванням [15, 16]. Одержували екстракти проб для визначення валового вмісту ВМ та вмісту кислоторозчинних форм (1,0 моль/дм³ HCl). Всі використані реагенти мали аналітичну чистоту.

Для визначення вмісту ВМ у ґрунтах використовували метод електротермічної атомно-абсорбційної спектроскопії (ЕТААС). Дослідження проводили на атомно-абсорбційному комплексі «КАС-120.1» (спектрометр «С-115М» та електротермічний атомізатор «Графіт-2») із комп'ютерною реєстрацією аналітичного сигналу. Як хімічний модифікатор використано високочистий Pd(NO₃)₂ (Suprapur®, Merck, Germany). Для визначення вмісту Меркурія застосовували

метод «холодної пари» (приставка «Юлія»). Визначення ВМ проводили за таких умов (довжина хвилі, нм): Cu – 324.8, Zn – 213.9, Mn – 279.5, Mo – 313.3, Co – 240.7; Pb – 283.3; Hg – 253.7.

У роботі використано стандартні статистичні методи, а саме коефіцієнти кореляції Пірсона і Спірмена розраховували за допомогою програм SPSS Statistics (IBM) та OriginPro (OriginLab Corporation). Для картографування територій використано програму ArcGIS 10.2.1.

Результати визначення валового вмісту ВМ та кислоторозчинних форм у гумусовому ґрунтовому горизонті представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Результати визначення валового вмісту / кислоторозчинних форм ВМ у гумусовому ґрунтовому горизонті Закарпатської області (n=6; P=0.95)

Досліджуваний район	Вміст ВМ ($\bar{X} \pm \delta$), мг/кг сухого ґрунту: валовий / кислоторозчинних форм						
	Cu	Zn	Mn	Mo	Co	Pb	Hg
1	8,5±0,4 / 1,33±0,07	17,6±0,9 / 9,4±0,5	1013±56 / 132±7	0,59±0,04 / н/в	3,9±0,2 / 0,41±0,02	4,1±0,2 / 1,6±0,1	0,06±0,01 / н/в
2	9,8±0,5 / 1,27±0,07	19,3±1,1 / 10,9±0,6	912±55 / 98±6	0,74±0,04 / н/в	5,1±0,2 / 0,62±0,03	4,3±0,2 / 1,5±0,1	0,05±0,01 / н/в
3	11,4±0,5 / 1,05±0,05	20,7±1,1 / 9,6±0,5	834±48 / 116±6	0,89±0,05 / н/в	5,6±0,3 / 0,49±0,03	4,6±0,3 / 1,4±0,1	0,06±0,01 / н/в
Усереднення для гірських районів	9,9 / 1,22	19,2 / 10,0	920 / 115	0,74 / н/в	4,9 / 0,51	4,3 / 1,5	0,06 / н/в
4	12,8±0,6 / 0,88±0,05	21,8±1,2 / 11,7±0,6	642±32 / 91±6	1,27±0,07 / 0,09±0,01	5,9±0,3 / 0,48±0,03	5,2±0,3 / 1,7±0,2	0,14±0,01 / н/в
5	16,1±0,7 / 1,38±0,07	26,8±1,3 / 11,9±0,6	579±30 / 74±4	1,03±0,05 / н/з	8,2±0,4 / 0,94±0,05	7,3±0,4 / 1,9±0,2	0,09±0,01 / н/в
6	12,1±0,6 / 0,97±0,05	22,9±1,1 / 10,1±0,5	547±31 / 64±4	1,34±0,07 / 0,14±0,02	6,2±0,3 / 0,81±0,04	5,4±0,3 / 1,6±0,1	0,09±0,01 / н/в
7	15,4±0,6 / 1,19±0,06	24,1±1,1 / 11,2±0,6	698±35 / 94±6	1,29±0,06 / 0,15±0,02	6,7±0,3 / 1,03±0,05	5,9±0,3 / 1,8±0,2	0,08±0,01 / н/в
8	14,6±0,6 / 1,14±0,06	30,7±1,5 / 14,2±0,7	724±37 / 87±5	1,54±0,08 / 0,18±0,02	7,1±0,3 / 0,86±0,04	7,8±0,5 / 2,1±0,2	0,11±0,01 / н/в

Продовження таблиці 1

9	17,4±0,7 / 1,93±0,10	33,9±1,7 / 13,8±0,7	466±23 / 61±3	1,64±0,08 / 0,18±0,02	8,3±0,4 / 1,12±0,05	6,6±0,4 / 1,9±0,2	0,15±0,01 / н/в
Усереднення для передгірських районів	14,7 / 1,25	26,7 / 12,2	609 / 79	1,35 / 0,12	7,1 / 0,87	6,4 / 1,8	0,11 / н/в
10	16,7±0,7 / 2,16±0,11	29,8±1,5 / 12,7±0,7	257±13 / 42±3	1,55±0,07 / 0,13±0,02	7,8±0,4 / 0,93±0,05	7,9±0,5 / 2,0±0,2	0,08±0,01 / н/в
11	19,8±0,9 / 2,07±0,10	36,6±1,8 / 13,5±0,7	516±26 / 77±5	1,74±0,09 / 0,16±0,02	9,5±0,5 / 1,19±0,05	8,1±0,5 / 1,9±0,2	0,09±0,01 / н/в
12	21,3±0,9 / 2,34±0,12	40,1±2,1 / 15,4±0,8	361±18 / 56±3	1,82±0,09 / 0,20±0,02	10,1±0,5 / 1,44±0,06	7,7±0,5 / 2,2±0,2	0,10±0,01 / н/в
13	18,7±0,8 / 1,79±0,09	35,1±1,8 / 16,2±0,8	298±15 / 45±3	1,79±0,09 / 0,22±0,02	9,2±0,4 / 1,27±0,06	6,8±0,4 / 2,0±0,2	0,08±0,01 / н/в
Усереднення для низовинних районів	19,1 / 2,20	35,4 / 14,5	358 / 55	1,73 / 0,18	9,2 / 1,21	7,6 / 2,0	0,09 / н/в

Примітка. Райони: 1 – Рахівський; 2 – Міжгірський; 3 – Воловецький; 4 – Свалявський; 5 – Тячівський; 6 – Великоберезнянський; 7 – Перечинський; 8 – Іршавський; 9 – Хустський; 10 – Ужгородський; 11 – Мукачівський; 12 – Берегівський; 13 – Виноградівський; н/в – не виявлено.

Дані табл. 1 показують, що вміст ВМ у гумусовому ґрунтовому горизонті є невеликим. Усереднені дані для різних ландшафтних зон суттєво відрізняються, що, вочевидь, пов'язано як із геохімічними особливостями територій, так і зі співвідношенням у них ґрунтів різного типу. Так, наприклад, згідно даних [17], валовий вміст Си у ґрунтотворних породах Закарпаття становить 12–51 мг/кг (найнижчий у піщаних алювіальних відкладеннях, а найвищий – у глинистих алювіальних і алювіальних-делювіальних відкладах), а у ґрунтотворних породах Карпат – 26–42 мг/кг (найнижчий у елювії флішу, а найвищий – у елювій-делювії флішу). Порівняння одержаних нами результатів визначення валового вмісту різних ВМ у ґрунтах з даними роботи [17] показує, що вміст ВМ у ґрунтах за нашими даними є дещо нижчим. Це, вочевидь, пов'язано з різною методологією одержання проб ґрунтів. Так, нами

проведено усереднення для кожного району області на основі 10 проб (всього було відібрано 130 проб) для територій різного ступеня освоєння, тоді як автори [17] відносили результати дослідження по відношенню до типу ґрунту на основі аналізу від 4 до 20 проб зі значною варіацією одержаних результатів. Загалом визначений вміст ВМ у гумусовому ґрунтовому горизонті Закарпатської області є нижчим за величини ГДК як для валового вмісту, так і вмісту рухомих форм [17].

Попередня оцінка даних табл. 1 показує, що існує загальна тенденція щодо збільшення вмісту ВМ у ґрунтах для різних ландшафтних зон: низовинні райони > передгірські райони > гірські райони. Винятками є Mn, який має протилежну закономірність (рис. 2), що пов'язано, вочевидь, із геохімічними особливостями досліджуваних територій, та Hg – який не має вираженої закономірності розподілу у ґрунтах різ-

них ландшафтних зон. Найвищий вміст Hg спостерігають у ґрунтах Свалявського і Хустського районів, що пов'язано з наявністю покладів ртутних руд у цих районах.

Рис. 2. Карта Закарпатської області по валовому вмісту Mn у ґрунтах

Для порівняння вмісту ВМ у ґрунтах різних ландшафтних зон (зі збільшенням висоти місцевості) нами розраховані коефіцієнти Спірмана, які відповідно становлять. Валовий вміст ВМ: Cu – (-0,84); Zn – (-0,83); Mn – 0,77; Mo – (-0,91); Co – (-0,82); Pb – (-0,83); Hg – немає; вміст кислоторозчинних форм: Cu – немає; Zn – (-0,72); Mn – 0,75; Mo – (-0,89); Co – (-0,86); Pb – (-0,77); Hg – немає. Одержані дані показують виражену кореляцію щодо вмісту ВМ у ґрунтах при переході від гірських до передгірських і низовинних районів (крім Mn та Hg).

Для більшості ВМ встановлено виражену міжелементну кореляцію щодо їхнього вмісту у ґрунтах, яку оцінювали за коефіцієнтом Пірсона. Така інформація є важливою для прогнозування вмісту кількох хімічних елементів у ґрунтах на основі результатів визначення одного з них. Відповідні розрахунки коефіцієнтів Пірсона для валового вмісту ВМ у ґрунтах представлено у табл. 2,

а для унаочнення одержаних результатів – на рис. 3 представлено відповідну кореляційну діаграму.

Рис. 3. Кореляційна діаграма міжелементної кореляції валового вмісту ВМ у ґрунтах (коефіцієнти кореляції Пірсона)

Міжелементна кореляція вмісту кислоторозчинних форм ВМ у ґрунтах Закарпатської області є менш вираженою, ніж валового вмісту ВМ, що видно з даних табл. 3 і рис. 4. Вочевидь, це пов'язано, крім геохімічних особливостей територій, з типом ґрунтів та їхньою кислотністю.

Рис. 4. Кореляційна діаграма міжелементної кореляції вмісту кислоторозчинних форм ВМ у ґрунтах (коефіцієнти кореляції Пірсона)

Таблиця 2

Результати розрахунку кореляції (коефіцієнтів кореляції Пірсона) міжелементного валового вмісту ВМ у ґрунтах Закарпатської області ($r > 0,5$; $\sigma < 0,05$)

X	Cu	Zn	Mn	Mo	Co	Pb	Hg
Cu	X	0,96	-0,84	0,89	0,99	0,87	–
Zn	0,96	X	-0,79	0,91	0,96	0,86	–
Mn	-0,84	-0,79	X	-0,86	-0,84	-0,75	–
Mo	0,89	0,91	-0,86	X	0,87	0,81	–
Co	0,99	0,96	-0,84	0,87	X	0,87	–
Pb	0,87	0,86	-0,75	0,81	0,87	X	–
Hg	–	–	–	–	–	–	X

Таблиця 3

Результати розрахунку кореляції (коефіцієнтів кореляції Пірсона) міжелементного вмісту кислоторозчинних форм ВМ у ґрунтах Закарпатської області ($r > 0,5$; $\sigma < 0,05$)

X	Cu	Zn	Mn	Mo	Co	Pb
Cu	X	0,67	-0,62	–	0,76	0,67
Zn	0,67	X	-0,72	0,79	0,83	0,87
Mn	-0,62	-0,72	X	-0,70	-0,76	-0,68
Mo	–	0,79	-0,70	X	0,78	0,74
Co	0,76	0,83	-0,76	0,78	X	0,80
Pb	0,67	0,87	-0,68	0,74	0,80	X

Для оцінки потенційної небезпеки міграції ВМ у системі ґрунт – рослина або ґрунт – вода важливе значення має відношення вмісту кислоторозчинної форми до валового вмісту ВМ (міграційний коефіцієнт). Із даних табл. 1 видно, що найвищі значення міграційний коефіцієнт (МК) мають Zn та Pb. Так, значення МК для Zn для гірських районів становить 52,1%, для передгірських – 45,7%, для низовинних –

41,0%. Така тенденція свідчить, що більшу міграційну здатність (і біодоступність) Zn має у ґрунтах гірських районів. Вочевидь, це пов'язано з типом ґрунтів гірських районів. Для Pb і Cu також найбільша міграційна здатність характерна для ґрунтів гірських районів. Так, значення МК для Pb для гірських районів становить 34,9%, для передгірських – 28,1%, для низовинних – 28,9%.

Отже, для оцінки потенційної небезпеки ВМ, які наявні у ґрунтах, важливе значення має не тільки їхній валовий вміст, але й вміст кислоторозчинних форм, що визначає міграційну здатність ВМ та їхню біодоступність.

ВИСНОВКИ. На основі скринінгу вмісту деяких важких металів у гумусовому ґрунтовому горизонті Закарпатської області встановлено, що валовий вміст більшості ВМ у ґрунтах різних ландшафтних зон змінюється у ряді: низовинні райони > передгірські райони > гірські райони. Для Mn спостерігається протилежна залежність його вмісту у ґрунтах різних ландшафтних зон, а для Hg – залежності не встановлено. Ці дані підтверджено відповідними значеннями коефіцієнтів кореляції Спірмана. Для більшості ВМ (крім Hg) встановлено виражену міжелементну кореляцію (оцінювали за коефіцієнтами Пірсона) щодо їхнього вмісту у ґрунтах, що дозволяє прогнозувати вміст декількох ВМ на основі результатів визначення одного з них. Обґрунтована доцільність використання значення міграційного показника (відношення вмісту кислоторозчинних форм ВМ до валового вмісту) як критерію небезпеки ВМ у ґрунтах.

Роботу частково виконано у рамках
Держбюджетної теми Міністерства
освіти і науки України, номер реєст-
рації 0117U000379.

SCREENING OF THE CONTENT OF SOME HEAVY METALS AT THE HUMUS SOIL HORIZON OF THE TRANSCARPATHIAN REGION

S. M. Sukharev, L. M. Bugyna, O. V. Pallah,
O. Yu. Sukhareva, V. G. Drobnych,
N. V. Boyko*

*State University 'Uzhhorod National University',
Pidhirna Str. 46, Uzhhorod, Ukraine
e-mail: serhii.sukharev@uzhnu.edu.ua

Based on the screening of some heavy metals (HMs) content in the humus soil horizon of the Transcarpathian region, the regularities of the distribution of HMs in the soils of different landscape zones have been established. It is shown that increasing of the terrain height, the content of HMs in soils decreases (except for Mn and Hg) and for the total HMs content the values of the Spearman correlation coefficient are: Cu – (-0.84); Zn – (-0.83); Mn 0.77; Mo – (-0.91); Co – (-0.82); Pb – (-0.83); Hg – absent; for the content of acid-soluble forms: Cu – absent; Zn – (-0.72); Mn 0.75; Mo – (-0.89); Co – (-0.86); Pb – (-0.77); Hg is absent. This pattern is associated with the tectonic and geological features of the different landscape zones. The calculation of the migration coefficient (the ratio of the content of acid-soluble forms to the gross content) has been shown that in mountainous regions this indicator has the highest

value for Zn, Pb, and Cu. That means the potential danger of migration of these heavy metals and their bioavailability. This is probably connected to the type of soil in the mountainous areas of the region. A pronounced inter-element correlation of the HMs content in soils (except for Hg) has been established and the corresponding values of Pearson's coefficients for the gross content are: Cu:Zn – 0,96; Cu:Mn – (-0,84); Cu:Mo – 0,89; Cu:Co – 0,99; Cu:Pb – 0,87; Zn:Mn – (-0,79); Zn:Mo – 0,91; Zn:Co – 0,96; Zn:Pb – 0,86; Mn:Mo – (-0,86); Mn:Co – (-0,84); Mn:Pb – (-0,75); Mo:Co – 0,87; Mo:Pb – 0,81; Co:Pb – 0,87. This makes it possible to predict the content of several HMs in the soils of the Transcarpathian region based on the results of determining one of them. In general, the content of HMs in the humus soil horizon (total content and content of mobile forms) is lower than the corresponding values of maximum permissible concentrations.

Keywords: soils; geochemical features; gross content; acid-soluble form; migration coefficient.

© С. М. Сухарев, Л. М. Бугина, О. В. Паллаг, О. Ю. Сухарева, В. Г. Дробнич, Н. В. Бойко, 2021

ЛІТЕРАТУРА

1. Wu X., Cobbina S. J., Mao G., Xu H., Zhang Z., Yang L. A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment // Environmental Science and Pollution Research. – 2016. – 23. – P. 8244–8259.

2. Ali H., Khan E., Ilah I. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation // *Journal of Chemistry*. – 2019. – ID 6730305 (1–14).
3. Violante A., Cozzolino V., Perelomov L., Caporale A.G., Pigna M. Mobility and bio-availability of heavy metals and metalloids in soil environments // *Journal of soil science and plant nutrition*. – 2010. – **10(3)**. – P. 268–292.
4. Acosta J. A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., Martínez-Martínez S. Salinity increases mobility of heavy metals in soils // *Chemosphere*. – 2011. – **85(8)**. – P. 1318–1324.
5. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals // *Interdisciplinary Toxicology*. – 2014. – **7(2)**. – P. 60–72.
6. Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review // *Environmental Chemistry Letters*. – 2010. – **8**. – P. 199–216.
7. Rana S.V.S. Perspectives in Endocrine Toxicity of Heavy Metals – A Review // *Biological Trace Element Research*. – 2014. – **160**. – P. 1–14.
8. Jan A.T., Azam M., Siddiqui K., Ali A., Choi I., Haq Q.M.R. Heavy Metals and Human Health: Mechanistic Insight into Toxicity and Counter Defense System of Antioxidants // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2015. – **16**. – P. 29592–29630.
9. Ghazala M., Setsuko K. Toxicity of heavy metals and metal-containing nanoparticles on plants // *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) – Proteins and Proteomics*. – 2016. – **1864(8)**. – P. 932–944.
10. Alia N., Sardar K., Said M., Salma K., Sadia A., Sadaf S., Toqeer A., Miklas S. Toxicity and Bioaccumulation of Heavy Metals in Spinach (*Spinacia oleracea*) Grown in a Controlled Environment // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2015. – **12**. – P. 7400–7416.
11. De Matos A. T., Fontes M. P. F., Da Costa L. M., Martinez M. A. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils // *Environmental Pollution*. – 2001. – **111(3)**. – P. 429–435.
12. Dang Z., Liu C., Haigh M.J. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal mine spoils // *Environmental Pollution*. – 2002. – **118(3)**. – P. 419–426.
13. Evangelou M.W.H., Ebel M., Schaeffer A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism, toxicity, and fate of chelating agents // *Chemosphere*. – 2007. – **68(6)**. – P. 989–1003.
14. Sukharev S., Bugyna L., Pallah (Sarvash) O., Sukhareva (Riabukhina) T., Drobnych V., Yerem K. Screening of the microelements composition of drinking well water of Transcarpathian region, Ukraine // *Heliyon*. – 2020. – **6(3)**. – P. e03535.
15. Tokaliogʻlu Ş., Kartal Ş., Güneş, A.A. Determination of Heavy Metals in Soil Extracts and Plant Tissues at Around of a Zinc Smelter // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. – 2001. – **80(3)**. – P. 201–217.
16. Safarova V.I., Shaidullina G.F., Mikhe-

eva T.N., Kudasheva F.K., Nizamutdinova N.R. Methods of sample preparation of soil, bottom sediments, and solid wastes for atomic absorption determination of heavy metals // *Inorganic Materials*. – 2011. – **47(14)**. – P. 1512–1517.

17. Фоновий вміст мікроелементів у ґрунтах України / за ред. А. І. Фатєєва і Я. В. Пащенко. – Харків: Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського», 2003. – 72 с.

REFERENCES

1. Wu X., Cobbina S.J., Mao G., Xu H., Zhang Z., Yang L. A review of toxicity and mechanisms of individual and mixtures of heavy metals in the environment. *Environmental Science and Pollution Research*. 2016. **23**: 8244.
2. Ali H., Khan E., Ilah I. Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019. ID 6730305.
3. Violante A., Cozzolino V., Perelomov L., Caporale A.G., Pigna M. Mobility and bioavailability of heavy metals and metalloids in soil environments. *Journal of soil science and plant nutrition*. 2010. **10(3)**: 268.
4. Acosta J.A., Jansen B., Kalbitz K., Faz A., Martínez-Martínez S. Salinity increases mobility of heavy metals in soils. *Chemosphere*. 2011. **85(8)**: 1318.
5. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B.B., Beeregowda K.N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014. **7(2)**: 60.
6. Nagajyoti P.C., Lee K.D., Sreekanth T.V.M. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters*. 2010. **8**: 199.
7. Rana S.V.S. Perspectives in Endocrine Toxicity of Heavy Metals – A Review. *Biological Trace Element Research*. 2014. **160**: 1.
8. Jan A.T., Azam M., Siddiqui K., Ali A., Choi I., Haq Q.M.R. Heavy Metals and Human Health: Mechanistic Insight into Toxicity and Counter Defense System of Antioxidants. *International Journal of Molecular Sciences*. 2015. **16**: 29592.
9. Ghazala M., Setsuko K. Toxicity of heavy metals and metal-containing nanoparticles on plants. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics*. 2016. **1864(8)**: 932.
10. Alia N., Sardar K., Said M., Salma K., Sadia A., Sadaf S., Toqeer A., Miklas S. Toxicity and Bioaccumulation of Heavy Metals in Spinach (*Spinacia oleracea*) Grown in a Controlled Environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2015. **12**: 7400.
11. De Matos A.T., Fontes M.P.F., Da Costa L.M., Martinez M.A. Mobility of heavy metals as related to soil chemical and mineralogical characteristics of Brazilian soils. *Environmental Pollution*. 2001. **111(3)**: 429.
12. Dang Z., Liu C., Haigh M.J. Mobility of heavy metals associated with the natural weathering of coal mine spoils. *Environmental Pollution*. 2002. **118(3)**: 419.
13. Evangelou M.W.H., Ebel M., Schaeffer A. Chelate assisted phytoextraction of heavy metals from soil. Effect, mechanism,

- toxicity, and fate of chelating agents. *Chemosphere*. 2007. **68(6)**: 989.
14. Sukharev S., Bugyna L., Pallah (Sarvash) O., Sukhareva (Riabukhina) T., Drobnich V., Yerem K. Screening of the microelements composition of drinking well water of Transcarpathian region, Ukraine. *Heliyon*. 2020. **6(3)**: e03535.
15. Tokaliogʻlu Ş., Kartal Ş., Güneş, A.A. Determination of Heavy Metals in Soil Extracts and Plant Tissues at Around of a Zinc Smelter. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2001. **80(3)**: 201.
16. Safarova V.I., Shaidullina G.F., Mikheeva T.N., Kudasheva F.K., Nizamutdinova N.R. Methods of sample preparation of soil, bottom sediments, and solid wastes for atomic absorption determination of heavy metals. *Inorganic Materials*. 2011. **47(14)**: 1512.
17. Fonovyi vmist mikroelementiv u gruntakh Ukrainy. Eds. Fatieieva A.I., Pashchenko Ya.V. (Kharkiv: Natsionalnyi naukovyi tsentr «Instytut hruntoznastva ta ahrokhimii im. O.N. Sokolovskoho», 2003). 72. [In Ukraine].

Стаття надійшла 09.03.21