

УМІСТ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ДОННИХ ВІДКЛАДАХ ОСУШЕНОГО КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА

О.М. Грищенко¹, Р.П. Паламарчук¹, І.В. Циганов²,
В.О. Сироватко³, Ю.М. Яценко¹

¹ Державна установа «Інститут охорони ґрунтів України» (м. Київ, Україна)

e-mail: grischenkoel@ukr.net; ORCID: 0000-0002-1241-7183

e-mail: prp777@ukr.net; ORCID: 0000-0002-5965-1305

e-mail: yuliya_yatsenko@ukr.net; ORCID: 0009-0006-3402-3093

² Запорізька філія ДУ «Держґрунтохорона» (м. Запоріжжя, Україна)

e-mail: zprgrunt@ukr.net; ORCID: 0009-0000-3478-9968

³ Дніпропетровська філія ДУ «Держґрунтохорона»

(с. Дослідне, Дніпровський р-н, Дніпропетровська обл., Україна)

e-mail: dnprompetrovsk@iogu.gov.ua; ORCID: 0009-0002-2576-3269

У статті висвітлено екологічну небезпеку руйнування дамби Каховської ГЕС та осушення Каховського водосховища. Наведено результати експериментальних досліджень вмісту рухомих сполук та валових форм важких металів у п'яти пробах донних відкладів, відібраних із дна осушених водойм на території Кушугумської громади Запорізького р-ну Запорізької обл. Дві проби відібрано з дна колишньої плавневої зони (сmt Балабине), дві — з дна колишнього вапнякового кар'єру, який сполучався з плавневою частиною Дніпра (сmt Кушугум) та одна проба відібрана з відкритої території Каховського водосховища (сmt Малокатеринівка). За результатами досліджень встановлено перевищення ГДК (для ґрунту) рухомих сполук свинцю, цинку, кадмію та нікелю в усіх досліджуваних пробах донних відкладів. Перевищення ГДК (ґрунту) за вмістом валових форм свинцю встановлено у п'яти пробах донних відкладів. Збільшення ГДК ґрунту за вмістом валових форм кадмію і марганцю та рухомих сполук міді, нікелю, кобальту й марганцю не виявлено. ГДК вмісту рухомих сполук заліза й валових форм цинку, міді, нікелю, кобальту та заліза не регламентується. Найвищий ступінь забруднення донних відкладів за вмістом: рухомих сполук та валових форм свинцю й нікелю виявлено у пробах відібраних з дна колишнього вапнякового кар'єру (сmt Кушугум Запорізької обл.); цинку — у пробі, відібраній із дна колишньої плавневої зони на території сmt Балабине та пробі — з відкритої території Каховського водосховища на території сmt Малокатеринівка; кадмію — у пробі відібраній із дна колишнього вапнякового кар'єру на території сmt Балабине та пробі — з відкритої території Каховського водосховища на території сmt Малокатеринівка. За результатами кореляційного аналізу встановлено надзвичайно сильну залежність між вмістом рухомих сполук важких металів та їх валових форм.

Ключові слова: руйнування греблі Каховської ГЕС, забруднювачі, рухомі сполуки, валова форма, клас безпеки, кореляція.

ВСТУП

Каховське водосховище створено у 1955–1958 рр. на Дніпрі під час будівництва Каховської ГЕС. Площа водосховища становила 2155 км², об'єм води — майже 18,2 км³. Каховське водосховище було найнижчим у каскаді дніпровських водосховищ, простягалось на 230 км уздовж Дніпра територіями трьох областей — Дніпропетровської, Запорізької та Херсонської. Слід

зауважити, що водосховищу була властива найменша у каскаді дніпровських водосховищ проточність (не більше 1,6–1,8 см/с), а водообмін не перевищував 2–3 рази впродовж року. Тому водосховище було дуже замуленим (понад 82% акваторії), а товщина донних відкладів варіювала від 0,1 до 1 м (в середньому по акваторії 0,19 м) [1; 2].

Донні відклади відіграють особливу роль у житті водойм, оскільки беруть участь у кругообігу речовин, відобража-

ють їх стан і тенденції щодо накопичення екополютантів, дають змогу оцінити в просторі та часі зміни розподілу і міграції компонентів у системі «вода – донні відклади» [3; 4]. За даними науковців, мули та донні відкладення природних водойм і водосховищ містять різні забруднювачі органічного та неорганічного походження, десятиліттями потрапляли у водойми з неочищеними скидами промисловості тощо [5–7]. Вони є активними накопичувачами важких металів, на вміст яких у донних відкладах водойм впливає кілька чинників, серед яких є геохімічні особливості їх басейну, наявність джерел надходження важких металів, вміст гумінових речовин тощо [3; 8; 9].

Донні відклади можна розглядати як індикатори забруднення водного об'єкта та навколишнього природного середовища загалом [4; 9]. На відміну від органічних речовин, які певною мірою піддаються деструктуризації, важкі метали лише перерозподіляються між окремими ланками водних екосистем (вода, донні відклади, біота). Тому дослідження вмісту важких металів у донних відкладах є невід'ємною частиною програм екологічного моніторингу довкілля [10].

Через підрив Каховської ГЕС дно Каховського водосховища та інших водних об'єктів оголилося. Після висихання донні відклади та не нейтралізований мул перетворюються на пил, який разом зі шкідливими речовинами поширитися вітром на значні території. Забруднений пил осяде на навколишні поля, що зумовить підвищення токсичного потенціалу ґрунту та призведе до забруднення рослинницької продукції [11;12].

Метою досліджень було визначення екоотоксикологічного стану територій за вмістом важких металів, що зазнали осушення після підриву дамби Каховського водосховища. Дослідження наявності важких металів у донних відкладах із dna осушеного Каховського водосховища дасть можливість оцінити потенційну загрозу погіршення еколого-токсикологічного стану земель сільськогосподарського призна-

чення, які розташовані поряд з об'єктом дослідження внаслідок вітрової ерозії та пилових бур.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дослідження важких металів у водоймищах Дніпра відбуваються впродовж тривалого часу та дають змогу встановити основні закономірності їх міграції й розподілу в системі «вода – завись – донні відклади». Однак значна увага науковців, під час вивчення водних об'єктів, приділяється саме донним відкладам, оскільки вони безпосередньо беруть участь у формуванні складу води завдяки процесам адсорбції, десорбції, дифузії різноманітних хімічних речовин, а також важких металів та їх сполук зокрема [13]. Цій темі присвячено роботи вітчизняних науковців, а саме: О. Федоненка [2], В. Зацерковного [6], Ю. Войтюк [9], П. Линник [13], Є. Обухова [14] тощо.

За даними В. Зацерковного [6] та Є. Обухова [14], Каховське водосховище зазнавало значного техногенного навантаження та акумулювало не лише запаси води, але й усі забруднення, що надходили із площі водозбору. Води та донні відклади водосховища були забруднені біогенними, органічними і поверхнево-активними речовинами, нафтопродуктами, фенолами, пестицидами, важкими металами тощо. Серед водосховищ Дніпра найбільшу кількість важких металів (Fe, Cd, Pb, Cr, Zn, Mg, Ni, Cu, Mn та ін.) містили саме донні відклади Каховського водосховища.

Для оцінки стану донних відкладів важливим є вивчення як валового вмісту важких металів, так і їх рухомих сполук [10].

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом досліджень слугували п'ять змішаних проб донних відкладень, відібраних на території Кушугумської громади Запорізького р-ну Запорізької обл., а саме: смт Балабине – дві проби (1 та 2) з dna колишньої плавневої зони; смт Кушугум – дві проби (3 та 4) з dna колишнього



Рис. 1. Місця відбору донних відкладень

вапнякового кар'єру, який сполучався з плавневою частиною Дніпра; смт Малокатеринівка – одну пробу (5) з відкритої території Каховського водосховища (рис. 1).

Лабораторний аналіз донних відкладів здійснювали в акредитованій лабораторії (за стандартом ISO/IEC–17025:2017) Дніпропетровської філії ДУ «Держґрунтоохорона». Слід зауважити, що вміст важких металів у донних відкладах в Україні не нормується [4]. Тому для вивчення еколого-токсикологічного впливу осушених донних відкладів, які можуть поширитися вітром на значні території та призвести до підвищення токсичного потенціалу ґрунту на землях сільськогосподарського призначення, використано методики, які застосовуються під час дослідження ґрунтів. Уміст валових форм важких металів визначали відповідно до ДСТУ ISO 11047:2005 [15], рухомих сполук важких металів – ДСТУ 4770:1-7,9:2007 [16–23].

Для оцінки еколого-токсикологічного стану донних відкладів уміст важких мета-

лів порівнювали з гранично допустимою концентрацією (ГДК) забруднювачів у ґрунті [24].

Розрахунки кореляційних взаємозв'язків проводили методом кореляційного аналізу за такою градацією: коефіцієнт кореляції (r) $< 0,3$ – залежність слабка, у межах $0,3–0,7$ – середня, $> 0,7$ – сильна (перевищує критичне значення).

Статистичну обробку отриманих результатів здійснювали в пакеті програм Excel та Statistika 6.0.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Важливість визначення валового вмісту важких металів полягає у тому, що ця форма перебування важких металів є найбільш небезпечною, адже рухомі форми можуть виноситись за межі території, враховуючи сприятливу для цього міграційну структуру, тоді як нерухомі чи малорухомі елементи становлять загрозу у разі їх накопичення та збільшення концентрації у ґрунтах.

За результатами проведених досліджень встановлено, що вміст рухомих сполук **свинцю** у точках відбору донних відкладів варіював від 11,93 до 24,65 мг/кг донних відкладів, валовий вміст — від 35,23 до 47,16 мг/кг донних відкладів. Перевищення ГДК (для ґрунту) відмічено в усіх пробах донних відкладів як за вмістом рухомих сполук свинцю (від 2,0 до 4,1 раза), так і за вмістом їх валових форм (від 1,1 до 1,5 раза) (табл. 1, 2; рис. 2, 3).

Найвищий ступінь забруднення донних відкладів за вмістом рухомих сполук та валових форм свинцю виявлено у пробах 3 і 4, відібраних із дна колишнього вапнякового кар'єру, який сполучався з плавневою частиною Дніпра (див. рис. 1).

Уміст рухомих сполук **цинку** в точках відбору донних відкладів варіював від 55,06 до 123,83 мг/кг донних відкладів, валовий вміст — від 71,01 до 262,04 мг/кг донних відкладів. У результаті проведених

Таблиця 1. Уміст рухомих сполук важких металів I класу небезпеки [25] у донних відкладах водойм, які зазнали осушення внаслідок руйнування Каховської ГЕС

| Проба ґрунту | Свинець, мг/кг ґрунту | | Цинк, мг/кг ґрунту | | Кадмій, мг/кг ґрунту | |
|--------------------------------|-----------------------|----------|--------------------|----------|----------------------|----------|
| | уміст | % до ГДК | уміст | % до ГДК | уміст | % до ГДК |
| 1 | 14,8* | 246,7 | 55,06* | 239,4 | 1,34* | 191,4 |
| 2 | 16,51* | 275,2 | 123,83* | 538,4 | 1,41* | 201,4 |
| 3 | 24,65* | 410,8 | 76,56* | 332,9 | 1,78* | 254,3 |
| 4 | 19,5* | 325,0 | 77,25* | 335,9 | 1,51* | 215,7 |
| 5 | 11,93* | 198,8 | 86,05* | 374,1 | 1,35* | 192,9 |
| Середнє значення | 17,48* | 291,3 | 83,75* | 364,1 | 1,48* | 211,1 |
| Стандартна помилка | 2,17 | | 11,22 | | 0,08 | |
| Середньоквадратичне відхилення | 4,86 | | 25,14 | | 0,18 | |
| Коефіцієнт варіації | 0,28 | | 0,30 | | 0,12 | |
| Min | 11,93 | | 55,06 | | 1,34 | |
| Max | 24,65 | | 123,83 | | 1,78 | |
| НІР _{0,5} | 6,03 | | 31,21 | | 0,23 | |

Примітка: * показник перевищує ГДК (ГДК для рухомих сполук свинцю — 6 мг/кг ґрунту, цинку — 23 мг/кг ґрунту, кадмію — 0,7 мг/кг ґрунту [24]).



Рис. 2. Уміст рухомих сполук свинцю у пробах донних відкладень

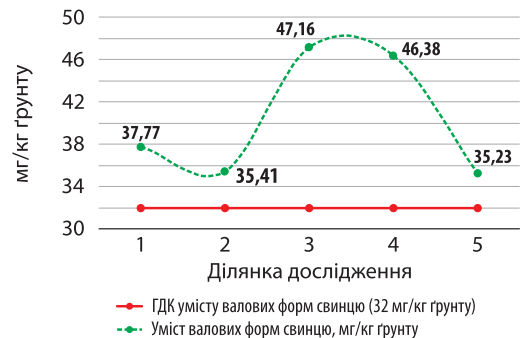


Рис. 3. Уміст валових форм свинцю у пробах донних відкладень

Таблиця 2. Уміст валових форм важких металів I класу небезпеки [25] у донних відкладах водоєм, які зазнали осушення внаслідок руйнування Каховської ГЕС

| Проба ґрунту | Свинець, мг/кг ґрунту | | Цинк, мг/кг ґрунту | Кадмій, мг/кг ґрунту | |
|--------------------------------|-----------------------|----------|--------------------|----------------------|----------|
| | уміст | % до ГДК | уміст | уміст | % до ГДК |
| 1 | 37,77* | 118,0 | 71,01 | 1,81 | 60,3 |
| 2 | 35,41* | 110,7 | 262,04 | 2,08 | 69,3 |
| 3 | 47,16* | 147,4 | 220,99 | 2,65 | 88,3 |
| 4 | 46,38* | 144,9 | 198,82 | 2,47 | 82,3 |
| 5 | 35,23* | 110,1 | 204,16 | 2,02 | 67,3 |
| Середнє значення | 40,39* | 126,2 | 191,40 | 2,21 | |
| Стандартна помилка | 2,64 | | 32,02 | 0,15 | |
| Середньоквадратичне відхилення | 5,92 | | 71,72 | 0,34 | |
| Коефіцієнт варіації | 0,15 | | 0,37 | 0,16 | |
| Min | 35,23 | | 71,01 | 1,81 | |
| Max | 47,16 | | 262,04 | 2,65 | |
| НІР _{0,5} | 7,34 | | 89,04 | 0,43 | |

Примітка: * показник перевищує ГДК (ГДК для валового вмісту свинцю – 32 мг/кг ґрунту, кадмію – 3 мг/кг ґрунту, цинку – не нормується [24]).

досліджень в усіх пробах донних відкладів виявлено перевищення ГДК вмісту рухомих сполук цинку (від 2,4 до 5,4 раза). ГДК вмісту валових форм цинку не регламентується (див. табл. 1, 2; рис. 4, 5).

Найвищий ступінь забруднення донних відкладів за вмістом рухомих сполук цинку встановлено у пробі 2, відібраній із dna колишньої плавневої зони на території смт Балабине.

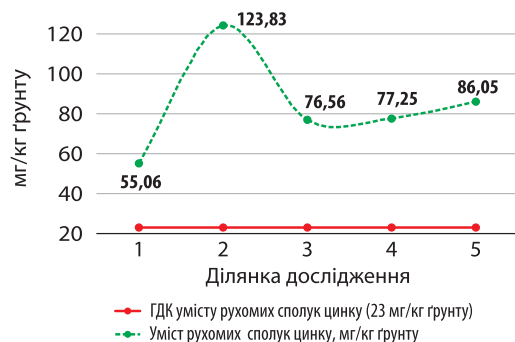


Рис. 4. Уміст рухомих сполук цинку у пробах донних відкладень

Уміст рухомих сполук кадмію у відібраних пробах донних відкладень варіював у межах 1,34–1,78 мг/кг донних відкладів, валових форм – від 1,81 до 2,65 мг/кг донних відкладів. Перевищення ГДК вмісту рухомих сполук кадмію відмічено в усіх досліджуваних пробах донних відкладів (від 1,9 до 2,5 раза). За вмістом валових форм кадмію перевищення ГДК не виявлено (див. табл. 1, 2; рис. 6, 7).

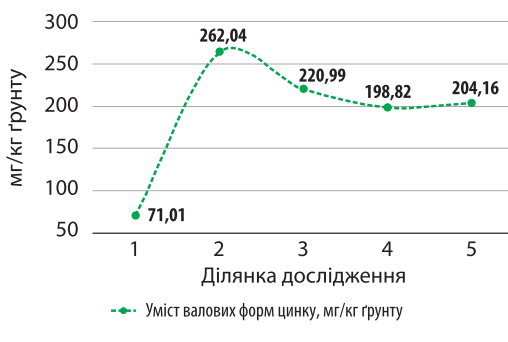


Рис. 5. Уміст валових форм цинку у пробах донних відкладень



Рис. 6. Уміст рухомих сполук кадмію у пробах донних відкладень

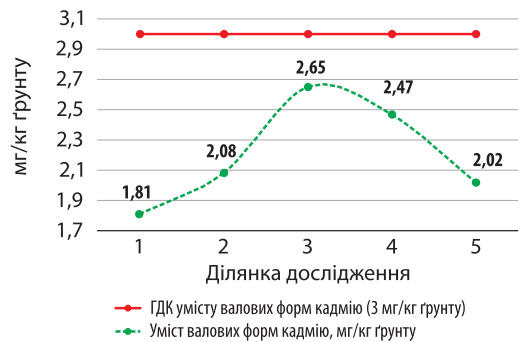


Рис. 7. Уміст валових форм кадмію у пробах донних відкладень

Найвищий ступінь забруднення донних відкладів за вмістом рухомих сполук та валових форм кадмію встановлено у пробі 3, відібраній із дна колишнього вапнякового кар'єру, який сполучався з плавневою частиною Дніпра на території смт Кушугум.

Уміст рухомих сполук та валових форм кадмію у досліджуваних пробах характеризувався слабкою варіабельністю — 0,12 і 0,16% відповідно.

Уміст рухомих сполук *міді* в досліджуваних пробах донних відкладів сягав у межах 1,25–2,09 мг/кг донних відкладів, валовий уміст — від 13,29 до 16,98 мг/кг донних відкладів. Встановлено, що вміст рухомих сполук міді у досліджуваних пробах не перевищував ГДК ґрунту. Уміст валових форм міді не регламентується (табл. 3; рис. 8, 9).

Коефіцієнт варіації за вмістом рухомих сполук та валових форм міді характеризу-

Таблиця 3. Уміст рухомих сполук та валових форм важких металів II класу небезпеки [25] у донних відкладах водойм, які зазнали осушення внаслідок руйнування Каховської ГЕС

| Проба донного відкладу | Мідь, мг/кг ґрунту | | | Нікель, мг/кг ґрунту | | | Кобальт, мг/кг ґрунту | | |
|--------------------------------|--------------------|--------------|--------------|----------------------|------------|--------------|-----------------------|-------------|--------------|
| | рухомі сполуки | % до ГДК | валова форма | рухомі сполуки | % до ГДК | валова форма | рухомі сполуки | % до ГДК | валова форма |
| 1 | 2,09 | 69,67 | 16,98 | 6,25* | 156 | 10,18 | 3,99 | 79,8 | 5,17 |
| 2 | 1,73 | 57,67 | 15,47 | 6,39* | 160 | 14,29 | 3,48 | 69,6 | 5,34 |
| 3 | 1,53 | 51,00 | 16,28 | 8,96* | 224 | 21,87 | 4,15 | 83,0 | 5,85 |
| 4 | 1,75 | 58,33 | 13,29 | 8,27* | 207 | 16,98 | 3,71 | 74,2 | 5,90 |
| 5 | 1,25 | 41,67 | 15,76 | 4,15* | 104 | 9,82 | 0,83 | 16,6 | 2,68 |
| Середнє значення | 1,67 | 55,67 | 15,56 | 6,80* | 170 | 14,63 | 3,23 | 64,6 | 4,99 |
| Стандартна помилка | 0,14 | | 0,62 | 0,84 | | 2,24 | 0,61 | | 0,59 |
| Середньоквадратичне відхилення | 0,31 | | 1,39 | 1,89 | | 5,02 | 1,37 | | 1,33 |
| Коефіцієнт варіації | 0,19 | | 0,09 | 0,28 | | 0,34 | 0,42 | | 0,27 |
| Min | 1,25 | | 13,29 | 4,15 | | 9,82 | 0,83 | | 2,68 |
| Max | 2,09 | | 16,98 | 8,96 | | 21,87 | 4,15 | | 5,90 |
| НІР _{0,5} | 0,38 | | 1,73 | 3,25 | | 6,24 | 1,70 | | 1,65 |

Примітка: * показник перевищує ГДК (ГДК для рухомих сполук міді — 3 мг/кг ґрунту, нікелю — 4 мг/кг ґрунту, кобальту — 5 мг/кг ґрунту, ГДК валових форм нікелю, міді та кобальту не нормується [24]).

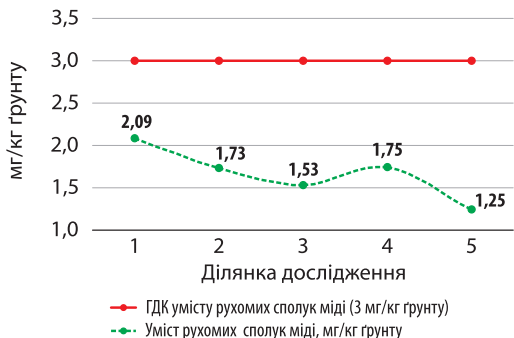


Рис. 8. Уміст рухомих сполук міді у пробах донних відкладень

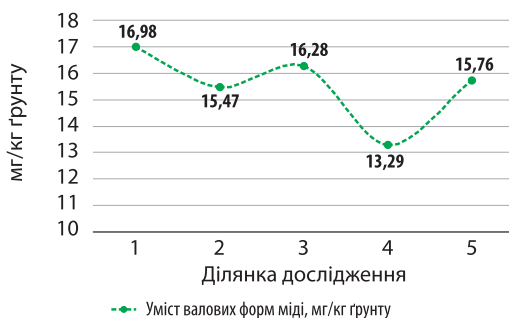


Рис. 9. Уміст валових форм міді у пробах донних відкладень

ється незначною варіабельністю — 0,19 і 0,09% відповідно.

Установлено, що вміст рухомих сполук **нікелю** в досліджуваних пробах варіював від 4,15 до 8,96 мг/кг донних відкладів, валовий вміст — від 9,82 до 21,87 мг/кг донних відкладів. Перевищення ГДК рухомих сполук нікелю встановлено в усіх пробах донних відкладів (від 1,04 до 2,2 раза). ГДК умісту валових форм нікелю не регламентується (див. *табл. 3; рис. 10, 11*).

Найвищий ступінь забруднення донних відкладів за вмістом рухомих сполук та валових форм нікелю виявлено у пробах 3 і 4 відібраних із dna колишнього вапняково-кар'єру, який сполучався з плавневою частиною Дніпра (сmt Кущугум).

Уміст рухомих сполук **кобальту** в досліджуваних пробах донних відкладів варіював у межах 0,83–3,99 мг/кг донних від-

кладів, валовий вміст — від 2,68 до 5,9 мг/кг донних відкладів. Встановлено, що вміст рухомих сполук кобальту у досліджуваних пробах не перевищував ГДК ґрунту. Вміст валових форм кобальту не регламентується (див. *табл. 3; рис. 12, 13*).

Уміст рухомих сполук **заліза** у пробах донних відкладів варіював від 7,28 до 29,99 мг/кг донних відкладів, валових форм — від 3036,4 до 3974,0 мг/кг донних відкладів (*табл. 4; рис. 14, 15*). ГДК умісту рухомих сполук та валових форм заліза не регламентується.

Найвищий вміст рухомих сполук заліза виявлено у пробі 5, відібраній із відкритої території Каховського водосховища (сmt Малокатеринівка).

Уміст рухомих сполук **марганцю** у точках відбору перебував у межах 60,54–75,06 мг/кг донних відкладів, валових

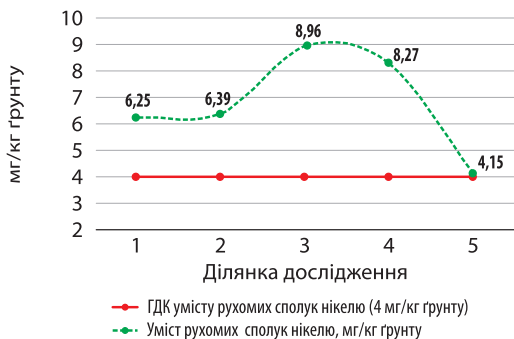


Рис. 10. Уміст рухомих сполук нікелю у пробах донних відкладень

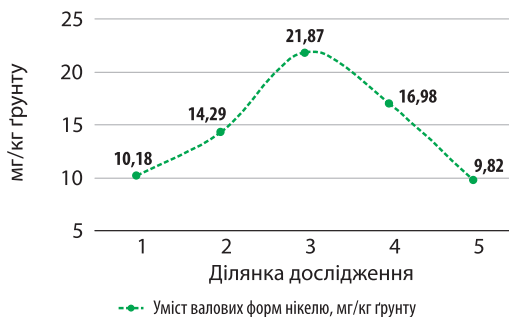


Рис. 11. Уміст валових форм нікелю у пробах донних відкладень



Рис. 12. Уміст рухомих сполук кобальту у пробах донних відкладень

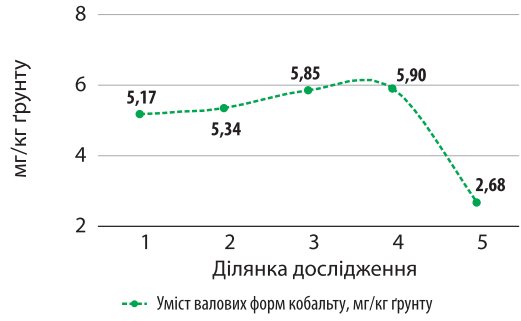


Рис. 13. Уміст валових форм кобальту у пробах донних відкладень

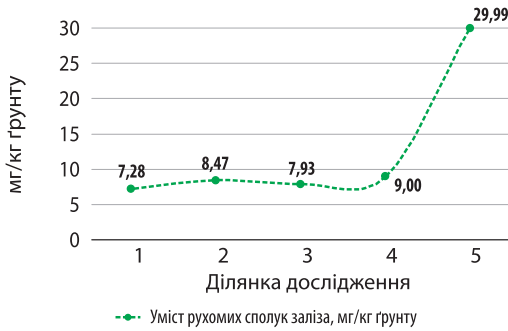


Рис. 14. Уміст рухомих сполук заліза у пробах донних відкладень

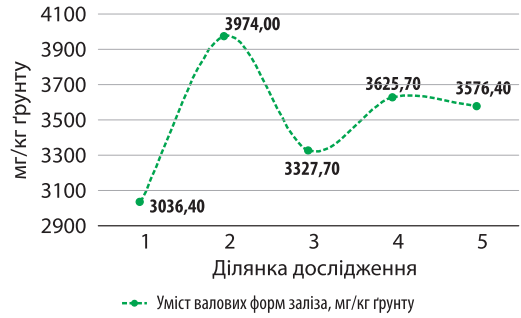


Рис. 15. Уміст валових форм заліза у пробах донних відкладень

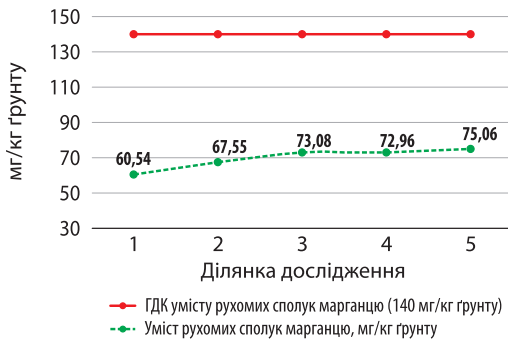


Рис. 16. Уміст рухомих сполук марганцю у пробах донних відкладень

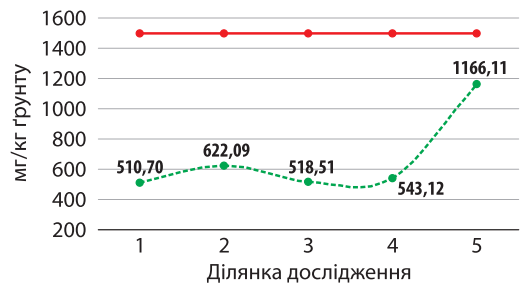


Рис. 17. Уміст валових форм марганцю у пробах донних відкладень

форм — від 510,7 до 1166,11 мг/кг донних відкладів (див. *табл. 4; рис. 16, 17*). Перевищень ГДК за вмістом рухомих сполук та валових форм марганцю у досліджуваних пробах донних відкладів не виявлено.

Найвищий уміст сполук марганцю, як і вміст заліза виявлено у пробі 5, що відібрано із відкритої території Каховського водосховища (сmt Малокатеринівка).

Таблиця 4. Уміст валових форм важких металів III класу небезпеки [25] у донних відкладах водойм, які зазнали осушення внаслідок руйнування Каховської ГЕС

| Проба ґрунту | Залізо, мг/кг ґрунту | | Марганець, мг/кг ґрунту | | | |
|--------------------------------|----------------------|---------------|-------------------------|----------|----------------|----------|
| | рухомі сполуки | валова форма | рухомі сполуки | % до ГДК | валова форма | % до ГДК |
| 1 | 7,28 | 3036,1 | 60,54 | 43,24 | 510,70 | 34,05 |
| 2 | 8,47 | 3974,0 | 67,55 | 48,25 | 622,09 | 41,47 |
| 3 | 7,93 | 3327,7 | 73,08 | 52,2 | 518,51 | 34,57 |
| 4 | 9,00 | 3625,7 | 72,96 | 52,11 | 543,12 | 36,21 |
| 5 | 29,99 | 3576,4 | 75,06 | 53,61 | 1166,11 | 77,74 |
| Середнє значення | 12,53 | 3508,0 | 69,84 | 49,88 | 672,11 | 44,81 |
| Стандартна помилка | 4,37 | 156,4 | 2,63 | | 124,84 | |
| Середньоквадратичне відхилення | 9,78 | 350,3 | 5,90 | | 279,65 | |
| Коефіцієнт варіації | 0,78 | 0,1 | 0,08 | | 0,42 | |
| Min | 7,28 | 3036,1 | 60,54 | | 510,70 | |
| Max | 29,99 | 3974,0 | 75,06 | | 1166,11 | |
| НІР _{0,5} | 12,14 | 434,9 | 7,32 | | 347,18 | |

Примітка: * показник перевищує ГДК (ГДК для рухомих сполук марганцю – 140 мг/кг ґрунту, валового вмісту марганцю – 1500 мг/кг ґрунту, ГДК заліза – не нормується [24]).

За результатами досліджень вмісту рухомих сполук важких металів та їх валових форм у пробах донних відкладів, встановлено кореляційні зв'язки між їх умістом. Найтіснішу позитивну залежність відмічено між вмістом рухомих та валових форм кобальту ($r=0,96$), кадмію ($r=0,92$), нікелю ($r=0,91$), свинцю ($r=0,88$) й цинку ($r=0,84$), що свідчить про досить активний перехід (міграцію/трансформацію) валової

форми важких металів у рухому під дією різноманітних чинників навколишнього середовища (табл. 5). Зв'язок середньої сили виявлено між вмістом рухомих сполук та валових форм марганцю ($r=0,50$), слабкий зв'язок – між умістом різних форм міді ($r=0,13$) й заліза ($r=0,16$). Ці сполуки мають значно меншу рухомість та трансформаційну здатність і не впливають на вміст рухомих сполук елементів.

Таблиця 5. Уміст та співвідношення валової та рухомої форм важких металів у донних відкладах водойм, які зазнали осушення внаслідок руйнування Каховської ГЕС

| Показники, мг/кг ґрунту | Валовий уміст | Уміст рухомих сполук | Співвідношення валової форми та рухомої | Кореляційна залежність між умістом валової та рухомої форми (r) |
|-------------------------|-----------------------|----------------------|---|---|
| Pb | 40,39 ± 5,92 | 17,48 ± 4,86 | 2,31 | 0,88 |
| Zn | 191,4 ± 71,72 | 83,75 ± 25,14 | 2,29 | 0,84 |
| Cd | 2,21 ± 0,34 | 1,48 ± 0,18 | 1,49 | 0,92 |
| Cu | 15,56 ± 1,39 | 1,67 ± 0,31 | 9,30 | 0,13 |
| Mn | 672,11 ± 279,65 | 69,89 ± 5,90 | 9,60 | 0,50 |
| Fe | 3508,0 ± 350,3 | 12,53 ± 9,78 | 280,00 | 0,16 |
| Ni | 14,63 ± 5,02 | 6,8 ± 1,89 | 2,15 | 0,91 |
| Co | 4,99 ± 1,33 | 3,32 ± 1,37 | 1,50 | 0,96 |

Також було встановлено високе співвідношення валового вмісту металів і їх рухомих форм для таких металів, як залізо, марганець та мідь. Широке співвідношення між зазначеними рухомими та валовими формами важких металів свідчить про дефіцит зазначених елементів у розчинній (рухомій) формі; здатність донних відкладів протистояти їх негативному впливу й більшу ймовірність зниження активності процесів міграції та транслокації (переходу валової форми в рухому) (див. *табл. 5*).

ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень відмічено перевищення ГДК (для ґрунту) рухомих сполук свинцю (від 2,0 до 4,1 раза), цинку (від 2,4 до 5,4 раза), кадмію (від 1,9 до 2,5 раза) та нікелю (від 1,04 до 2,2 раза) у всіх досліджуваних пробах донних відкладів. За вмістом рухомих сполук міді, кобальту та марганцю перевищення ГДК не виявлено. Перевищення ГДК (ґрунту) за вмістом валових форм свинцю встановлено у п'яти пробах донних відкладів (від 1,1 до 1,5 раза). За вмістом валових форм кадмію та марганцю перевищень ГДК не встановлено.

Усі досліджувані об'єкти характеризуються високим рівнем забруднення та

можуть нести потенційну загрозу погіршення еколого-токсикологічного стану земель сільськогосподарського призначення, які розташовані поряд з об'єктом дослідження внаслідок вітрової ерозії та пилових бур. Найвищий ступінь забруднення донних відкладів за вмістом: рухомих сполук та валових форм **свинцю** й **нікелю** відмічено у пробах, відібраних з дна колишнього вапнякового кар'єру (сmt Кушугум Запорізької обл.); **цинку** — у пробі відібраній із дна колишньої плавневої зони на території сmt Балабине та пробі — з відкритої території Каховського водосховища на території сmt Малокатеринівка; **кадмію** — у пробі відібраній із дна колишнього вапнякового кар'єру на території сmt Балабине та пробі — з відкритої території Каховського водосховища на території сmt Малокатеринівка.

За результатами кореляційного аналізу встановлено надзвичайно сильну залежність щодо вмісту рухомих сполук важких металів та їх валових форм — для кобальту ($r=0,96$), кадмію ($r=0,92$), нікелю ($r=0,91$), свинцю ($r=0,88$) й цинку ($r=0,84$), що свідчить про досить активний перехід (міграцію/трансформацію) валової форми важких металів у рухому під дією різноманітних чинників навколишнього середовища.

ЛІТЕРАТУРА

1. Каховське водосховище. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Каховське_водосховище.
2. Федоненко О.В., Єсіпова Н.Б., Шарамок Т.С., Маренков О.М. Гідроекологічний стан Каховського водосховища. URL: https://www.researchgate.net/publication/323015807_Gidroekologichnij_stan_Kahovskogo_vodoshovisa.
3. Симканіч О.І., Кундрік К.М., Глух О.С., Сухарев С.М. Розподіл умісту важких металів у донних відкладах річки Уж у межах міста Ужгород. *Науковий вісник Ужгородського університету. Сер.: Хімія*. 2015. № 1 (33). С. 72–76.
4. Васенко О.Г., Мельников А.Ю. Важкі метали в донних відкладах р. Дунай на території України. *Екологічна безпека*. 2018. № 1 (25). С. 26–31.
5. Дудник С.В., Євтушенко М.Ю. Водна токсикологія: основні теоретичні положення та їхнє практичне застосування: моногр. Київ: Вид-во Українського фітосоціологічного центру, 2013. С. 107–124.
6. Зацерковний В.І., Оберемок Н.В., Тішаєв І.В., Казанюк Т.А. Використання технологій геοінформаційних систем та дистанційне зондування землі для моніторингу водних об'єктів. *Науковий технологічний журнал*. 2017. № 1 (33). С. 78–88.
7. Сухарев С.М. Визначення деяких важких металів у донних відкладах річки Боржава методом атомно-абсорбційної спектроскопії. *Науковий вісник Ужгородського університету. Сер.: Хімія*. 2015. № 1 (33). С. 45–49.
8. Виставна Ю.Ю., Решетченко А.І., Дянін Д.В. Важкі метали у донних відкладах міської та регіональної системи басейну р. Сіверський Донець. *Системи життєзабезпечення міст*. 2015. № 120. С. 59–63.
9. Войтюк Ю.Ю. та ін. Вміст та форми знаходження важких металів у донних відкладах в зоні впливу промислових джерел забруднення. *Вісник Дніпропетровського університету. Сер.: Геологія. Географія*. 2014. № 16. С. 208–214.
10. Тимчий К.І., Сідашенко О.І., Бабченко А.В., Сметанін В.Т. Розподіл важких металів у донних відкладах водойм після вермикультивування. *Проблеми екологічної біотехнології*. 2019. № 2. С. 1–9.

- URL: <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/14481/20891>.
- Мул з дна Каховської ГЕС є небезпечним. URL: <https://ctrcenter.org/uk/mul-z-dna-кахovskoyi-ges-ye-nebezpechnum>.
 - Знищення Каховської ГЕС: три глобальні загрози для людей, економіки та природи. URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/znyshchennya-kakhovskoyi-hes-naslidyk-zahrozy/32484191.html>.
 - Линник П.М., Малиновська Л.О., Зубенко І.Б., Зубко О.В. Важкі метали у водоймах Дніпра: форми міграції та їх трансформація під впливом комплексування й адсорбції. URL: <https://www.kspu.edu/FileDownload.ashx/alm7.gar?id=33b9cc7f-2130-49cc-b389-dbdcbf54ea74>.
 - Обухов Е.В. Каховському водосховищу — 55 років. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. № 10. С. 119–125.
 - ДСТУ ISO 11047:2005. Якість ґрунту. Визначення кадмію, хрому, кобальту, купруму, плумбуму, мангану, нікелю та цинку в екстракті, отриманому після оброблення ґрунту «царською водкою». Методи полуменевої та електротермічної атомно-абсорбційної спектроскопії (ISO 11047:1998, IDT). [Чинний від 2008-01-01]. Вид. офіс. Київ: Держстандарт України, 2004. 20 с.
 - ДСТУ 4770.1:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук марганцю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектроскопії. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіс. Київ: Держспоживстандарт, 2009. 14 с.
 - ДСТУ 4770.2:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук цинку в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектроскопії. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіс. Київ: Держспоживстандарт, 2009. 14 с.
 - ДСТУ 4770.3:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кадмію в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектроскопії. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіс. Київ: Держспоживстандарт, 2009. 14 с.
 - ДСТУ 4770.4:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук заліза в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектроскопії. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіс. Київ: Держспоживстандарт, 2009. 14 с.
 - ДСТУ 4770.5:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук кобальту в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектроскопії. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіс. Київ: Держспоживстандарт, 2009. 14 с.
 - ДСТУ 4770.6:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук міді в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектроскопії. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіс. Київ: «Держспоживстандарт», 2008. 4 с.
 - ДСТУ 4770.7:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук нікелю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектроскопії. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіс. Київ: Держспоживстандарт, 2009. 14 с.
 - ДСТУ 4770.9:2007. Якість ґрунту. Визначення вмісту рухомих сполук свинцю в ґрунті в буферній амонійно-ацетатній витяжці з рН 4,8 методом атомно-абсорбційної спектроскопії. [Чинний від 2009-01-01]. Вид. офіс. Київ: Держспоживстандарт, 2009. 14 с.
 - Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин: постановова від 17.12.2021. *Урядовий кур'єр*. 2021. № 243.
 - ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. [Введен в действие 1985-01-01]. Москва: Издательство стандартов, 1984. 3 с.

REFERENCES

- Kakhovske vodoshkoyshche [Kakhov reservoir]. (n.d.). URL: https://ukhttps://uk.wikipedia.org/wiki/Каховське_водосховище [in Ukrainian].
- Fedonenko, O.V., Esipova, N.B., Sharamok, T.S. & Marhenko, O.M. Hidroekologichnyi stan Kakhovskoho vodoshkoyshcha [Hydro-ecological condition of the Kakhov reservoir]. (n.d.). URL: https://www.researchgate.net/publication/323015807_Gidroekologichnij_stan_Kakhovskogo_vodoshovisa [in Ukrainian].
- Simkanych, O.I., Kundryk, K.M., Hlukh, O.S. & Sukharev, S.M. (2015). Rozpodil vmistu vazhkykh metaliv u donnykh vidkladakh richky Uzh u mezhakh mista Uzhhorod [Distribution of the content of heavy metals in bottom sediments of the Uzh River within the city of Uzhhorod]. *Naukovi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya: Khimiia — Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: Chemistry*, 1 (33), 72–76 [in Ukrainian].
- Vasenko, O.H. & Melnykov, A.Iu. (2018). Vazhki metaly v donnykh vidkladakh r. Dunai na terytorii Ukrainy [Heavy metals in bottom sediments of the Danube River on the territory of Ukraine]. *Ekologichna bezpeka — Ecological safety*, 1 (25), 26–31 [in Ukrainian].
- Dudnyk, S.V. & Yevtushenko, M.Iu. (2013). *Vodna toksykologhiia: osnovni teoretychni polozhennia ta yikhnie praktychne zastosuvannia: monografiia [Water toxicology: basic theoretical provisions and their practical application: monograph]*. Kyiv [in Ukrainian].
- Zatserkovnyi, V.I., Oberemok, N.V., Tishaiev, I.V. & Kazanyuk, T.A. (2017). Vykorystannia tekhnolohii heoinformatsiinykh system da dystantsiine zonduvannia zemli dlia monitorynhu vodnykh ob'ektiv [The use of technologies of geoinformation systems and remote sensing of the earth to monitor water bodies].

- Naukoiemni tekhnologii — Scientific technologies, 1* (33), 78–88 [in Ukrainian].
7. Sukharev, S.M. (2015). Vyznachennia deiakykh vazhkykh metaliv u donnykh vidkladakh richky Borzhava metodom atomno-absorbtsiinoi spektroskopii [Determination of some heavy metals in bottom sediments of the Borzhava River by atomic absorption spectroscopy]. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Seriya: Khimiia — Scientific Bulletin of Uzhhorod University. Series: Chemistry, (33)*, 45–49 [in Ukrainian].
 8. Vystavna, Yu.Iu., Reshetchenko, A.I. & Dianin, D.V. (2015). Vazhki metaly u donnykh vidkladakh miskoi ta rehionalnoi systemy baseinu r. Siverskyi Donets [Heavy metals in the bottom sediments of the urban and regional basin system of the Siverskyi Donets River]. *Systemy zhyttiezabezpechennia mist — Life support systems of cities, 120*, 59–63 [in Ukrainian].
 9. Voitiuk, Yu.Iu. et al. (2014). Vmist ta formy znakhodzheniia vazhkykh metaliv u donnykh vidkladakh v zoni vplyvu promyslovykh dzherel zabrudnennia [The content and forms of heavy metals in bottom sediments in the zone of influence of industrial sources of pollution]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriya: Geologiya. Gografiya — Bulletin of Dnipropetrovsk University. Series: Geology. Geography, 16*, 208–214 [in Ukrainian].
 10. Tymchi, K.I., Sidashenko, O.I., Babchenko, A.V. & Smetanin, V.T. (2019). Rozpodil vazhkykh metaliv u donnykh vidkladakh vodoim pislia vermykultyvuvannia [Distribution of heavy metals in bottom sediments of reservoirs after vermiculture]. *Problemy ekolohichnoi biotekhnologii — Problems of ecological biotechnology, 2*. URL: <https://jrn1.nau.edu.ua/index.php/ecobiotech/article/view/14481/20891> [in Ukrainian].
 11. Mul z dna Kakhovskoi HES ye nebezpechnym [Sludge from the bottom of Kakhovskaya HPP is dangerous]. (n.d.). URL: <https://ctrcenter.org/uk/mul-z-dna-kahovskoyi-ges-ye-nebezpechnym> [in Ukrainian].
 12. Znyshchennia Kakhovskoi HES: try hlobalni zahrozy dlia liudei, ekonomiky ta pryrody [Destruction of Kakhovskaya HPP: three global threats to people, economy and nature]. (n.d.). URL: <https://www.radiosvoboda.org/a/znyshchennia-kakhovskoyi-hes-naslidyk-zahrozy/32484191.html> [in Ukrainian].
 13. Lynnyk, P.M., Malynovska, L.O., Zubenko, I.B. & Zubko, O.V. (n.d.). Vazhki metaly u vodoimakh Dnipra: formy mihratsii ta yikh transformatsiia pid vplyvom kompleksoutvorennia y adsorbtsii [Heavy metals in the reservoirs of the Dnipro: forms of migration and their transformation under the influence of complexation and adsorption]. URL: <https://www.kspu.edu/FileDownload.ashx/alm7.rar?id=33b9cc7f-2130-49cc-b389-dbdcbf54ea74> [in Ukrainian].
 14. Obukhov, E.V. (2012). Kakhovskomu vodoshkovyshchu — 55 rokiv [Kakhovsky Reservoir is 55 years old]. *Ukrainskyi hidrometeorolohichnyi zhurnal — Ukrainian hydrometeorological journal, 10*, 1196–125 [in Ukrainian].
 15. Yakist gruntu. Vyznachennia kadmiiu, khromu, kobaltu, kuprumu, plumbumu, manhanu, nikolu ta tsynku v ekstrakti, otrymanomu pislia obroblennia gruntu «tsarskoiu vodkoiu». Metody polumenevoi ta elektrotermichnoi atomno-absorbtsiinoi spektrometrii (ISO 11047:1998, IDT) [Soil quality. Determination of cadmium, chromium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel and zinc in the extract obtained after treating the soil with aqua regia. Methods of flame and electrothermal atomic absorption spectrometry (ISO 11047:1998, IDT)]. (2004). *DSTU ISO 11047:2005 from 1st January 2008*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
 16. Yakist gruntu. Vyznachennia vmistu rukhomykh spoluk marhantsiu v grunti v buferanii amoniino-atsetatnii vytiashztsi z rN 4,8 metodom atomno-absorbtsiinoi spektrofotometrii [Soil quality. Determination of the content of mobile manganese compounds in the soil in a buffered ammonium acetate extract with pH 4.8 by the method of atomic absorption spectrophotometry]. (2009). *DSTU 4770.1:2007 from 1st January 2009*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
 17. Yakist gruntu. Vyznachennia vmistu rukhomykh spoluk tsynku v grunti v buferanii amoniino-atsetatnii vytiashztsi z pH 4,8 metodom atomno-absorbtsiinoi spektrofotometrii [Soil quality. Determination of the content of mobile zinc compounds in the soil in a buffered ammonium-acetate extract with pH 4.8 by the method of atomic absorption spectrophotometer]. (2009). *DSTU 4770.2:2007 from 1st January 2009*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
 18. Yakist gruntu. Vyznachennia vmistu rukhomykh spoluk kadmiiu v grunti v buferanii amoniino-atsetatnii vytiashztsi z pH 4,8 metodom atomno-absorbtsiinoi spektrofotometrii [Soil quality. Determination of the content of mobile cadmium compounds in the soil in a buffered ammonium-acetate extract with pH 4.8 by the method of atomic absorption spectrophotometry]. (2009). *DSTU 4770.3:2007 from 1st January 2009*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
 19. Yakist gruntu. Vyznachennia vmistu rukhomykh spoluk kobaltu v grunti v buferanii amoniino-atsetatnii vytiashztsi z pH 4,8 metodom atomno-absorbtsiinoi spektrofotometrii [Soil quality. Determination of the content of mobile cobalt compounds in the soil in the buffered ammonium acetate extract with pH 4.8 by the method of atomic absorption spectrophotometry]. (2009). *DSTU 4770.4:2007 from 1st January 2009*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
 20. Yakist gruntu. Vyznachennia vmistu rukhomykh spoluk kobaltu v grunti v buferanii amoniino-atsetatnii vytiashztsi z pH 4,8 metodom atomno-absorbtsiinoi spektrofotometrii [Soil quality. Determination of the content of mobile cobalt compounds in the soil in the buffered ammonium acetate extract with pH 4.8 by the method of atomic absorption spectrophotometry]. (2009). *DSTU 4770.5:2007 from 1st January 2009*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
 21. Yakist gruntu. Vyznachennia vmistu rukhomykh spoluk midi v grunti v buferanii amoniino-atsetatnii vytiashztsi z pH 4,8 metodom atomno-absorbtsiinoi spektrofotometrii [Soil quality. Determination of the content of mobile copper compounds in the soil in a buffered ammonium-acetate extract with pH 4.8 by

- the method of atomic absorption spectrophotometry]. (2008). *DSTU 4770.6:2007 from 1st January 2009*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
22. Yakist gruntu. Vyznachennia vmistu rukhomykh spolum nikeliu v grunti v buferonii amoniino-atsetatnii vytiazhtsi z pH 4,8 metodom atomno-absorbtsiinoi spektrofotometrii [Soil quality. Determination of the content of mobile nickel compounds in the soil in a buffered ammonium-acetate extract with pH 4.8 by the method of atomic absorption spectrophotometry]. (2009). *DSTU 4770.7:2007 from 1st January*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
23. Yakist gruntu. Vyznachennia vmistu rukhomykh spolum svyntsiu v grunti v buferonii amoniino-atsetatnii vytiazhtsi z pH 4,8 metodom atomno-absorbtsiinoi spektrofotometrii [Soil quality. Determination of the content of mobile lead compounds in the soil in a buffered ammonium-acetate extract with pH 4.8 by the method of atomic absorption spectrophotometry]. (2009). *DSTU 4770.9:2007 from 1st January*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart [in Ukrainian].
24. Pro zatverdzhennia normatyviv hranychno dopustymykh kontsentratsii nebezpechnykh rehovyn u gruntakh, a takozh pereliku takykh rehovyn: postanova vid 17.12.2021 [On approval of the standards of maximum permissible concentrations of dangerous substances in soils, as well as the list of the following substances: resolution of 17.12.2021]. (2021). *Uriadovi kurier — Government courier*, 243 [in Ukrainian].
25. Okhrana prirodi. Pochvi. Klasifikatsiya khimicheskikh veshchestv dlya kontrolya zagryazneniya [Nature protection. Soils Classification of chemical substances for pollution control]. (1984). *GOST 17.4.02-84 from 1st January 1985*. Moskva: Yzdatelstvo standartov [in Russian].

Стаття надійшла до редакції журналу 15.01.2024