ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 504.5:546.3 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.351

© Ю.В. Войтенко[1], Т.І. Русакова[1], О.В. Золотько[1], О.В. Долженкова[1], О.Ю. Гунько[1]
[1] Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна

ОЦІНЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ЗАБРУДНЕННЯ ДОННИХ ВІДКЛАДІВ ОСУШЕНОГО КАХОВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАХОДІВ РЕМЕДІАЦІЇ

Yu. Voitenko[1], https://orcid.org/0000-0003-0819-3794
T. Rusakova[1], https://orcid.org/0000-0001-5526-3578
O. Zolotko[1], https://orcid.org/0000-0003-2482-7574
O. Dolzhenkova[1], https://orcid.org/0000-0002-7970-8110
O. Gunko[1], https://orcid.org/0000-0001-9257-763X
[1] Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine

ASSESSMENT OF THE ENVIRONMENTAL HAZARD POSED BY HEAVY METAL CONTAMINATION OF BOTTOM SEDIMENTS IN THE DRAINED KAKHOVKA RESERVOIR AND JUSTIFICATION OF REMEDIATION MEASURES

Мета. Оцінити рівень забруднення донних відкладів осушеного Каховського водосховища важкими металами, визначити пріоритетні ділянки за рівнем екологічної небезпеки та обґрунтувати заходи їх ремедіації з урахуванням вимог екологічної безпеки.

Методика. Дослідження проведено на основі результатів лабораторного аналізу проб донних відкладів осушеного Каховського водосховища. Проведено власний аналітичний аналіз рівня забруднення донних відкладів, здійснено оцінку за сумарним показником забруднення, ранжування ділянок за пріоритетністю ремедіації та визначено необхідний рівень зниження концентрацій важких металів до нормативних значень.

Результати. За результатами лабораторного дослідження п’яти змішаних проб донних відкладів встановлено неоднорідний характер забруднення рухомими формами важких металів. Найбільш значущі перевищення нормативних значень зафіксовано для Pb, Zn, Cd та Ni, тоді як концентрації рухомих форм Cu і Co не перевищували ГДК. Розрахунок необхідного зниження концентрацій до рівня ГДК показав, що для окремих металів воно становить 49,7–81,4 %. Інтегральна оцінка за сумарним показником забруднення дала змогу визначити ділянки з найвищим рівнем забруднення: проби № 3 (Кушугум), № 2 (Балабине) та № 4 (Кушугум). На основі отриманих результатів проведено ранжування досліджених ділянок за пріоритетністю ремедіації та визначено напрями заходів, спрямованих на зниження екологічних ризиків і відновлення території.

Наукова новизна. Удосконалено підхід до комплексного оцінювання екологічного стану осушених донних відкладів Каховського водосховища шляхом поєднання оцінки вмісту рухомих форм важких металів, інтегрального визначення рівня забруднення, просторового ранжування ділянок та встановлення необхідного рівня зниження концентрацій до нормативних значень.

Практична значимість. Запропонований підхід дає змогу визначати пріоритетні ділянки осушеного водосховища для проведення ремедіаційних заходів та обирати їх залежно від рівня і характеру забруднення. Отримані результати можуть бути використані для планування заходів з відновлення території колишнього Каховського водосховища, обмеження міграції важких металів та запобігання вторинному поширенню забруднювачів.

Ключові слова: *Каховське водосховище, донні відклади, важкі метали, рухомі форми металів, сумарний показник забруднення, екологічні ризики, ремедіація, техногенно-екологічна безпека, цивільний захист.*

Вступ. Одним із важливих екологічних наслідків Каховської катастрофи 6 червня 2023 р стало оголення донних відкладів, які є потенційним джерелом вторинного поширення забруднювальних речовин, зокрема важких металів. В роботі [1] показано перевищення нормативних значень рухомих форм Pb, Zn, Cd та Ni в пробах донних відкладів осушеного Каховського водосховища.

Руйнування Каховської гідроелектростанції стало однією з найбільш масштабних воєнно-техногенних екологічних катастроф в Україні, наслідки якої охопили водні, ґрунтові та наземні екосистеми Нижнього Дніпра. Катастрофічне вивільнення води спричинило затоплення значних територій нижче греблі, тоді як різке спорожнення Каховського водосховища призвело до оголення близько 1870 км² його колишнього дна. Ці процеси супроводжувалися істотною трансформацією гідрологічного режиму, деградацією природних екосистем, втратами біорізноманіття, порушенням водопостачання та зрошення і значними соціально-економічними збитками [2].

Масштабна трансформація природно-технічної системи Нижнього Дніпра проявилася у втраті або порушенні функціонування природних оселищ, заплавних лісів, луків і степових екосистем, а також у зміні умов існування водних і наземних організмів. Одночасно осушення водосховища спричинило дефіцит водних ресурсів для питного водопостачання та зрошення, змінило гідрологічний режим річки та умови функціонування прилеглих екосистем. Результати супутникового моніторингу підтвердили масштабні просторові зміни природно-технічної системи регіону, зумовлені одночасним затопленням одних територій та дефіцитом води на інших [3].

Суттєві зміни відбулися і в структурі та функціонуванні водних екосистем. Винос значних обсягів прісної води, завислих речовин, донних відкладів і забруднювачів до Дніпро-Бузького лиману та Чорного моря спричинив зміни солоності, концентрацій біогенних речовин та умов існування водних організмів. У прибережній зоні Чорного моря після надходження вод Каховського водосховища зафіксовано істотне збільшення концентрації завислих речовин і короткочасне посилення явищ «цвітіння» води. Водночас сучасні дослідження [4] свідчать про здатність окремих компонентів екосистем до природного відновлення, що, однак, не виключає довготривалих екологічних ризиків, пов’язаних із забрудненням, деградацією оселищ та порушенням гідрологічного режиму.

Попередні дослідження [5, 6] підтверджують комплексний характер наслідків катастрофи, серед яких забруднення поверхневих і підземних вод, деградація ґрунтового покриву, втрата рослинного і тваринного біорізноманіття та негативний вплив на сільськогосподарські угіддя. Особливу екологічну небезпеку становить оголення донних відкладів, у яких можуть накопичуватися важкі метали та інші потенційно небезпечні речовини. За умов висушування, вітрової ерозії та зміни фізико-хімічних властивостей відкладів виникає ризик їх вторинної міграції та поширення в компоненти довкілля. У зв’язку з цим актуальним завданням є оцінювання екологічного стану оголених донних відкладів, визначення пріоритетних ділянок забруднення та обґрунтування ефективних заходів їх ремедіації [5, 6].

Аналіз попередніх досліджень. Після руйнування дамби Каховської ГЕС серйозне занепокоєння громадськості та наукової спільноти викликала проблема потенційного токсичного забруднення донних відкладів, що залишилися на оголеному дні водосховища. Українською природоохоронною групою проведено дослідження 119 проб ґрунтів, донних відкладів і матеріалу з осушених територій колишнього Каховського водосховища [7]. Дослідження охоплювали різні ландшафтно-геохімічні умови, зокрема донні відклади, тимчасово затоплені та осушені ділянки.

За результатами досліджень наслідків руйнування Каховської ГЕС встановлено значні масштаби накопичення токсичних речовин у донних відкладах колишнього водосховища. За оцінками дослідників, в оголених після осушення відкладах могло міститися близько 83,3 тис. т важких металів, серед яких особливе екологічне значення мають Pb, Cd та Ni. При цьому під час катастрофічного спуску води було винесено менше 1 % загальної кількості цих металів, що свідчить про збереження основної маси забруднювачів на території колишнього днища водосховища [8].

У роботі [9] зазначено, що донні відклади Каховського водосховища могли акумулювати важкі метали протягом понад 60 років його функціонування в умовах значного промислового та аграрного навантаження. У поверхневих шарах відкладів виявлено Fe, Mn, Cu, Zn, Cr та Cd. Після руйнування гідротехнічної споруди частина осадового матеріалу та пов’язаних із ним забруднювачів була переміщена вниз за течією до Дніпро-Бузького лиману та Чорного моря, що зумовлює необхідність подальшого контролю їх міграції та вторинного поширення.

Водночас наявні дослідження переважно характеризують загальні масштаби забруднення та вміст окремих важких металів, тоді як питання просторової диференціації забруднення оголених донних відкладів, співвідношення валових і рухомих форм металів та визначення пріоритетних ділянок для проведення ремедіаційних заходів потребують подальшого опрацювання. У зв’язку з цим доцільним є аналіз розподілу важких металів за окремими точками відбору проб із визначенням їх валових і рухомих форм. Такий підхід дає змогу виявити локальні осередки підвищеного забруднення, оцінити потенційну екологічну небезпеку рухомих форм металів та сформувати основу для ранжування ділянок за пріоритетністю ремедіації.

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Попри значну кількість досліджень екологічних наслідків руйнування Каховської ГЕС, недостатньо опрацьованим залишається питання просторової диференціації забруднення донних відкладів важкими металами та визначення пріоритетності заходів з їх ремедіації. Особливо актуальним є поєднання оцінювання екологічного стану донних відкладів із визначенням необхідного рівня їх очищення та обґрунтуванням ремедіаційних заходів з урахуванням ризиків вторинного поширення забруднювачів.

Метою роботи є екоаналітичне оцінювання забруднення рухомими формами важких металів донних відкладів осушеного Каховського водосховища,

визначення сумарного рівня забруднення досліджених ділянок, розрахунок необхідного зниження концентрацій металів до нормативного рівня та обґрунтування пріоритетних заходів ремедіації з урахуванням ризиків вторинного поширення забруднювачів і вимог екологічної безпеки.

Основна частина (Результати). Для проведення аналізу використано результати лабораторного дослідження п'яти змішаних проб донних відкладів, відібраних на території Кушугумської територіальної громади Запорізького району Запорізької області [1].

Відбір проб здійснювали у п'яти точках: № 1 та № 2 – смт Балабине, дно колишньої плавневої зони; № 3 та № 4 – смт Кушугум, дно колишнього вапнякового кар'єру, сполученого з плавневою частиною Дніпра; № 5 – смт Малокатеринівка, відкрита ділянка колишнього Каховського водосховища.

Для подальшого аналізу відібрано шість пріоритетних важких металів: Pb, Zn, Cd, Cu, Ni та Co. Для хімічних елементів, що природно присутні у ґрунтах і донних відкладах, ступінь антропогенного забруднення оцінюють за коефіцієнтом концентрації, який визначається як відношення фактичного вмісту елемента до його природного (фонового) вмісту [11].

Для оцінювання рівня перевищення концентрації важких металів над гранично допустимим рівнем використано коефіцієнт перевищення, який визначається за формулою:

$$K_i = \frac{C_i}{ГДК_i}, \quad (1)$$

де C_i – фактична концентрація рухомої форми i-ого металу, мг/кг; $ГДК_i$ – нормативне значення i-ого металу, мг/кг.

Результати розрахунків наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Кратність перевищення ГДК рухомих форм металів

Проба	Територія	K_{Pb}	K_{Zn}	K_{Cd}	K_{Cu}	K_{Ni}	K_{Co}
№1	Балабине	2,47	2,39	1,91	0,70	1,56	0,80
№2	Балабине	2,75	5,38	2,01	0,58	1,60	0,70
№3	Кушугум	4,11	3,33	2,54	0,51	2,24	0,83
№4	Кушугум	3,25	3,36	2,16	0,58	2,07	0,74
№5	Малокатеринівка	1,99	3,74	1,93	0,42	1,04	0,17

Результати визначення рухомих форм важких металів у донних відкладах осушеного Каховського водосховища свідчать про просторово неоднорідний поліметалічний характер забруднення. Перевищення нормативних значень встановлено для Pb, Zn, Cd та Ni, тоді як концентрації рухомих форм Cu і Co в усіх досліджених пробах були нижчими за ГДК.

Для рухомого Pb кратність перевищення ГДК становила 1,99–4,11, причому перевищення зафіксовано в усіх п'яти пробах. Максимальне значення 4,11 ГДК встановлено у пробі № 3 (Кушугум), тоді як у пробі № 4 на цій самій території

воно становило 3,25 ГДК. Це свідчить про підвищений рівень свинцевого забруднення та його локальну неоднорідність.

Для Zn діапазон кратності перевищення становив 2,39–5,38 ГДК. Максимальне значення 5,38 ГДК зафіксовано у пробі № 2 (Балабине), що є найбільшим перевищенням серед усіх досліджених металів. При цьому значення у пробі № 2 більш ніж удвічі перевищувало відповідний показник у пробі № 1 (5,38 проти 2,39 ГДК), що свідчить про виражену локальну неоднорідність забруднення цинком навіть у межах однієї території.

Кратність перевищення ГДК для Cd становила 1,91–2,54, з максимальним значенням 2,54 ГДК у пробі № 3. Для Ni цей показник змінювався від 1,04 до 2,24 ГДК, а максимальне значення (2,24 ГДК) також встановлено у пробі № 3. Таким чином, проба № 3 характеризується одночасним підвищенням концентрацій Pb, Zn, Cd та Ni, що дає підстави розглядати цю ділянку як один із найбільш виражених локальних осередків комплексного забруднення рухомими формами важких металів.

Для Cu кратність становила 0,42–0,70 ГДК, а для Co складала 0,17–0,83 ГДК. Оскільки в усіх пробах концентрації цих металів були нижчими за нормативні значення, Cu і Co за критерієм вмісту рухомих форм не належать до пріоритетних забруднювачів досліджених донних відкладів.

Оскільки перевищення нормативних значень встановлено для Pb, Zn, Cd та Ni, наступним етапом дослідження було визначення необхідного рівня зниження їх концентрацій до рівня ГДК. Цей показник використано як один із критеріїв для подальшого обґрунтування ремедіаційних заходів.

Необхідний рівень зниження концентрації визначали за формулою:

$$P_i = \frac{C_i - ГДК_i}{C_i} \cdot 100\%, \qquad (2)$$

де P_i – необхідне зниження концентрації i-ого металу до рівня ГДК, %; C_i – фактична концентрація рухомої форми металу, мг/кг; $ГДК_i$ – нормативне значення концентрації металу, мг/кг.

Таблиця 2

Необхідне зниження концентрації рухомих форм металів до рівня ГДК

Проба	Територія	P_{Pb}, %	P_{Zn}, %	P_{Cd}, %	P_{Ni}, %
№1	Балабине	59,5	58,2	47,6	35,9
№2	Балабине	63,6	81,4	50,2	37,5
№3	Кушугум	75,7	70,0	60,6	55,4
№4	Кушугум	69,2	70,2	53,7	51,7
№5	Малокатеринівка	49,7	73,3	48,2	3,8

Розрахунки показують, що для досягнення нормативного рівня необхідне суттєве зниження концентрацій більшості важких металів. Найбільше зниження потрібне для Zn у пробі №2 (81,4 %), Zn у пробі №5 (73,3 %), Zn у пробі №4 (70,2

%) та Zn у пробі №3 (70,0 %). Для Pb максимальна потреба у зниженні встановлена у пробі №3 – 75,7 %. У пробі №3 також необхідно забезпечити зниження Cd на 60,6 % та Ni на 55,4 %, що підтверджує її, як найбільш проблемну ділянку за комплексом забруднювачів.

Виявлена просторова неоднорідність та одночасна присутність декількох металів зумовлюють необхідність інтегральної оцінки забруднення. Інтегральний показник дозволяє об'єднати результати визначення декількох забруднювачів у єдину кількісну характеристику, порівняти території між собою, виявити осередки комплексного забруднення та обґрунтувати пріоритетність подальшого моніторингу й ремедіаційних заходів.

Для інтегральної оцінки був розрахований сумарний показник забруднення (Z_c) за формулою [11]:

$$Z_c = (\sum_{i=1}^{n} K_i) - (n - 1), \quad (3)$$

де Z_c – сумарний показник забрудненості ґрунтів; K_i – коефіцієнт концентрації i-го хімічного елемента в пробі ґрунту; n – кількість врахованих хімічних елементів.

Результати розрахунків наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Сумарний показник забруднення донних відкладів

Ранг	Проба	Територія	Z_c
1	№3	Кушугум	8,56
2	№2	Балабине	8,02
3	№4	Кушугум	7,16
4	№1	Балабине	4,83
5	№5	Малокатеринівка	4,28

Результати інтегральної оцінки забруднення за сумарним показником Z_c свідчать про неоднорідність забруднення досліджених територій. Значення Z_c змінювалися від 4,28 до 8,56, що дозволило ранжувати проби за рівнем комплексного забруднення. Найвище значення Z_c = 8,56 встановлено для проби №3 (Кушугум), для проби №2 (Балабине) визначено значення Z_c = 8,02. Для проби №4 (Кушугум) показник становив Z_c = 7,16.

Отже, саме території Кушугуму та Балабиного характеризуються найвищим сумарним металевим навантаженням. Нижчі значення отримано для проби №1 (Балабине) – Z_c = 4,83, та проби №5 (Малокатеринівка) – Z_c = 4,28. Таким чином, максимальне значення Z_c у пробі №3 було приблизно у 2 рази вищим, ніж мінімальне значення у пробі №5.

Важливо, що інтегральне ранжування дещо відрізняється від оцінки за окремими металами. Зокрема, проба №2 характеризувалася найвищим одиничним перевищенням за Zn, однак за сумарним показником Z_c вона посіла друге місце, тоді як проба №3, де одночасно спостерігалися підвищені рівні кількох пріоритетних металів, отримала найвище інтегральне значення.

Це підтверджує доцільність комплексного підходу до оцінювання забруднення, оскільки він дозволяє врахувати сукупний вплив декількох полютантів, а не лише максимальне значення окремого показника.

Отримані результати дають підстави визначити пробу №3 (Кушугум) як пріоритетну ділянку для подальшого екологічного моніторингу та розроблення ремедіаційних заходів (рис., позначена червоним кольором), проби №2 та №4 – як території другого пріоритету (рис. 1, позначені жовтим кольором), а проби №1 та №5 – як території останнього пріоритету (рис., позначені синім кольором).

Відповідно до встановленої пріоритетності, для ділянки №3, яка характеризується найвищим рівнем інтегрального забруднення, першочерговим завданням є визначення технології, здатної забезпечити максимальне зниження концентрацій пріоритетних металів. Для ділянок №2 та №4 доцільно розглянути комбіновані або менш інтенсивні методи відновлення, тоді як для ділянок №1 та №5 можливе застосування превентивних заходів, спрямованих насамперед на стабілізацію забруднювачів і запобігання їх подальшій міграції. Таким чином, результати інтегрального ранжування можуть бути використані як основа для обґрунтування вибору та послідовності застосування ремедіаційних технологій.

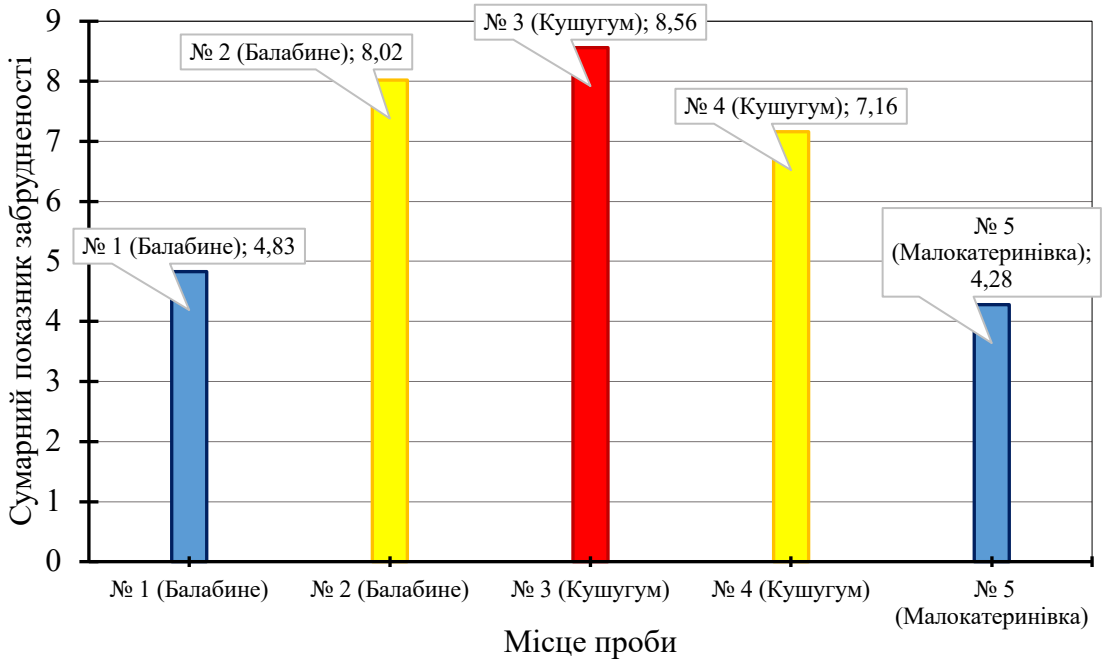


Рис. Результати інтегральної оцінки забруднення за сумарним показником

Одним із результатів дослідження є порівняння валових та рухомих форм металів [1] і визначення частки рухомої форми за формулою:

$$W_{рух} = \frac{C_{рух}}{C_{вал}} \cdot 100\ \%, \qquad (4)$$

де $W_{рух}$ – частка рухомої форми, %; $C_{рух}$ – уміст рухомих сполук, мг/кг; $C_{вал}$ – валовий вміст, мг/кг.

Результати дослідження наведені в таблиці 4 [1].

Таблиця 4

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

Метал	Валовий вміст, мг/кг [1]	Рухомий вміст, мг/кг [1]	Частка рухомої форми, %
Pb	40,39	17,48	43,28
Zn	191,40	83,75	43,76
Cd	2,21	1,48	66,97
Cu	15,56	1,67	10,73
Mn	672,11	69,89	10,40
Fe	3508,00	12,53	0,36
Ni	14,63	6,80	46,48
Co	4,99	3,32	66,53

Розрахована частка рухомої форми показує, що найбільша потенційна міграційна доступність характерна для Cd (66,97 %) та Co (66,53 %), а також для Ni (46,48 %), Zn (43,76 %) і Pb (43,28 %). Отже, значна частина валового вмісту цих металів представлена рухомими сполуками, що може підвищувати їх потенційну міграцію у змінених умовах осушеного водосховища.

На основі вихідних даних [1] щодо вмісту рухомих форм важких металів у досліджених пробах проведено кореляційний аналіз для встановлення геохімічних взаємозв'язків між полютантами, виявлення спільних джерел їх надходження та обґрунтування комплексності заходів ремедіації. Результати розрахунку парних коефіцієнтів кореляції наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Матриця парних коефіцієнтів кореляції вмісту рухомих форм важких металів

	Pb	Zn	Cd	Ni	Cu	Co
Pb	1,00					
Zn	-0,08	1,00				
Cd	0,96	-0,08	1,00			
Ni	0,95	-0,17	0,83	1,00		
Cu	0,05	-0,33	-0,21	0,29	1,00	
Co	0,70	-0,20	0,48	0,82	0,74	1,00

Аналіз матриці парної кореляції вмісту рухомих форм важких металів у досліджених пробах дозволив виявити специфічні геохімічні асоціації полютантів. Найбільш виражена синергетична залежність встановлена для групи пріоритетних токсикантів: $r_{Pb\text{-}Cd} = 0,96$, $r_{Pb\text{-}Ni} = 0,95$ та $r_{Cd\text{-}Ni} = 0,83$. Високий рівень кореляції між свинцем, кадмієм та нікелем свідчить про спільність їх техногенного походження (промислові скиди) та аналогічні умови накопичення й міграції в донних

відкладах. Наявність цієї асоціації означає, що ризики від їхнього впливу на екосистему та населення мають комбінований характер.

Натомість цинк (Zn) виявляє слабкий від'ємний зв'язок з іншими металами (з Pb $r = -0{,}08$; з Cd $r = -0{,}08$; з Ni $r = -0{,}17$), що вказує на специфічний, локалізований характер його просторового розподілу, зумовлений окремими джерелами забруднення або суттєвою відмінністю форм його міграції.

Наявність тісного зв'язку в тріаді Pb–Cd–Ni обґрунтовує необхідність застосування рослин-гіперакумуляторів поліметалічного спрямування (або сумішей культур, наприклад, горох, міскантус чи соняшник), здатних одночасно зв'язувати кілька елементів.

При виникненні вітрової ерозії осушеного дна населення смт Кушугум та смт Балабине піддаватиметься комплексному впливу свинцю, кадмію та нікелю. Це вимагає впровадження сумісних заходів спостереження та пилопригнічення (наприклад, фітостабілізації) для всієї зони вираженого осередку.

Дослідження донних відкладів осушеного Каховського водосховища показали наявність підвищених концентрацій рухомих форм Pb, Zn, Cd та Ni, що обґрунтовує необхідність не лише подальшого моніторингу, а й розроблення заходів щодо зниження їх екологічної небезпеки. Ремедіація територій, забруднених важкими металами, передбачає застосування комплексу фізичних, хімічних та біологічних методів, серед яких особливу перспективність для територій, постраждалих унаслідок воєнних дій, має фіторемедіація.

У наукових дослідженнях [12] фіторемедіацію розглядають як перспективний метод відновлення забруднених земель завдяки можливості вилучення або стабілізації важких металів без істотного порушення ґрунтового покриву. Встановлено, що окремі види рослин, так звані гіперакумулятори, здатні рости на ґрунтах із підвищеним умістом важких металів, накопичувати значні їх кількості протягом вегетаційного періоду та водночас не виявляти виражених ознак фітотоксичності. Зокрема, горох і міскантус характеризуються значним потенціалом акумуляції металів, що робить їх перспективними для використання на ґрунтах, постраждалих унаслідок воєнних дій.

У роботі [13] обґрунтовано спосіб фіторемедіації техногенно забруднених важкими металами ґрунтів, який передбачає розширення спектра фіторемедіантів за рахунок домінуючих трав'янистих дикорослих видів родин Asteraceae, Fabaceae та Poaceae і їх просторово-часового чергування. Такий підхід спрямований на вилучення важких металів різних класів небезпечності з різних шарів ґрунту, підвищення ефективності біологічної ремедіації та збільшення глибини очищення безпосередньо в осередку забруднення за одночасної мінімізації витрат.

Перспективність фіторемедіаційних технологій підтверджено також дослідженнями щодо використання соняшнику (Helianthus annuus L.) для вилучення Pb, Cd, Zn та Cu із забруднених ґрунтів [14]. Це свідчить про можливість застосування сільськогосподарських культур для ремедіації територій, забруднених унаслідок господарської діяльності та воєнних дій.

Сучасні дослідження, орієнтовані безпосередньо на відновлення територій України, постраждалих унаслідок воєнних дій, акцентують увагу на поєднанні фітоекстракції та фітостабілізації. У роботі [15] зазначено, що перспективними є не лише рослини-гіперакумулятори, а й швидкорослі види, здатні формувати значну біомасу та вилучати токсиканти в процесі тривалого вирощування. Для фітостабілізації доцільно використовувати, зокрема, енергетичні культури та багаторічні трави.

Перспективним напрямом є також поєднання фіторемедіації з внесенням речовин, здатних регулювати рухомість важких металів. Так, дослідження із застосуванням гумінових речовин, отриманих із українського бурого вугілля, у поєднанні з вирощуванням вівса показало зниження рухомих та екстрагованих форм Pb, Cd, Ni, Cu і Zn; за найвищої дози гуматів загальне зниження становило близько 47 %. Накопичення металів відбувалося переважно в коренях (68–90 %), тоді як лише 10–32 % транслокувалося до надземної біомаси, що свідчить про ефективну стабілізацію металів у системі «ґрунт–рослина» та зниження ризику їх трофічного перенесення [16].

Зібрану фіторемедіаційну біомасу, насичену важкими металами, необхідно піддавати контрольованому поводженню. Перспективними напрямами є термічна обробка з концентруванням металів у золі, піроліз або подальше вилучення металів із біомаси [17].

Проведений аналіз свідчить, що для осушених територій Каховського водосховища доцільно розглядати комбіновану систему ремедіації, яка поєднує фітостабілізацію для зменшення рухомості та вторинної міграції металів із фітоекстракцією для поступового їх вилучення. З огляду на встановлену для досліджених проб необхідність зниження концентрацій окремих металів приблизно на 50–81%, доцільним є проведення декількох послідовних циклів ремедіації з проміжним екоаналітичним контролем.

За результатами інтегральної оцінки найвищий рівень забруднення встановлено у пробі № 3 (Кушугум, Z_c = 8,56), де одночасно зафіксовано перевищення нормативних значень за Pb, Zn, Cd та Ni. Необхідне зниження концентрацій до рівня ГДК для цих металів становить відповідно 75,7; 70,0; 60,6 та 55,4 %. З огляду на комплексний характер забруднення та найвище значення інтегрального показника цю ділянку доцільно віднести до першого пріоритету ремедіації.

Для ділянки № 3 рекомендовано застосування комбінованої технології, яка передбачає первинну фітостабілізацію поверхневого шару з використанням рослин із розвиненою кореневою системою, внесення сорбційних матеріалів або гумінових речовин для зниження рухомості металів та подальшу фітоекстракцію. Такий підхід дасть змогу одночасно зменшити ризик вторинного поширення забруднювачів і поступово вилучати їх із субстрату. Особливу увагу необхідно приділити Pb, Zn, Cd та Ni, оскільки саме ці елементи визначають необхідний рівень ремедіаційного впливу.

До другого пріоритету доцільно віднести проби № 2 (Балабине, Z_c = 8,02) та № 4 (Кушугум, Z_c = 7,16). У пробі № 2 визначено перевищення за Pb, Zn, Cd та

Ni, причому найбільшим забруднювачем є Zn (5,38 ГДК). Для досягнення нормативного рівня його концентрацію необхідно знизити приблизно на 81,4 %. Оскільки саме Zn формує максимальне одиничне перевищення серед усіх досліджених проб, для цієї ділянки доцільно передбачити локальну інтенсивну ремедіацію, орієнтовану насамперед на зниження рухомості та вилучення Zn. Перспективним є поєднання сорбційної стабілізації з подальшою фітоекстракцією. Необхідність зниження концентрації Zn більш ніж на 80 % свідчить, що одного циклу біологічної ремедіації може бути недостатньо, тому доцільно передбачити повторний цикл із проміжним екоаналітичним контролем.

Для ділянки № 4 також доцільна комбінована фітостабілізаційно-фітоекстракційна технологія, але з меншою інтенсивністю порівняно з ділянкою № 3. Основними цільовими компонентами залишаються Zn та Pb, для яких необхідне зниження концентрацій становить близько 70 %.

Для ділянок, представлених пробами № 1 (Балабине, Z_c = 4,83) та № 5 (Малокатеринівка, Z_c = 4,28), доцільно застосовувати м’яку біологічну ремедіацію, насамперед фітостабілізацію з використанням багаторічної рослинності. Вона одночасно сприятиме зниженню рухомості металів та ризику вітрової ерозії осушених відкладів. Інтенсивні заходи з вилучення забрудненого матеріалу на цьому етапі застосовувати недоцільно; необхідність їх упровадження має визначатися за результатами подальшого моніторингу.

Окрім забруднення важкими металами, оголення донних відкладів Каховського водосховища формує потенційні ризики вторинного поширення забруднювачів унаслідок вітрової та водної ерозії [18]. З позицій безпеки населення та цивільного захисту це потребує розгляду осушених територій як потенційних джерел небезпечного впливу, зокрема через перенесення забрудненого пилу за межі осередків, поверхневий стік та можливе надходження важких металів до компонентів довкілля.

З точки зору безпеки життєдіяльності населення та цивільного захисту доцільно застосовувати зонування території, що дасть змогу оцінити рівень потенційної небезпеки для населення та визначити пріоритетність превентивних заходів. До зони найвищого пріоритету за сумарним показником віднесено ділянку № 3 (Кушугум), де доцільно передбачити посилений екологічний моніторинг, контроль доступу населення та заходи щодо запобігання вторинному поширенню забруднювачів повітряним і водним шляхами.

Зона підвищеного пріоритету охоплює ділянки № 2 (Балабине) та № 4 (Кушугум) і потребує регулярного контролю стану донних відкладів та факторів, здатних спричинити міграцію забруднювачів. Зона контрольованого ризику включає ділянки № 1 (Балабине) та № 5 (Малокатеринівка), для яких основним завданням є періодичний моніторинг і своєчасне виявлення тенденцій до погіршення стану.

Таке зонування може бути використане для диференційованого планування заходів цивільного захисту, організації системи екологічного спостереження та моніторингу, а також інформування населення про потенційні ризики.

Висновки. Отримані внаслідок аналізу і розрахунків результати дозволили зробити наступні висновки:

1. Встановлено, що руйнування Каховської ГЕС спричинило негативні комплексні екологічні наслідки для природних і техногенних систем регіону, а осушення водосховища сформувало екологічні ризики, пов'язані з можливим вторинним поширенням забруднювачів з оголених донних відкладів. Це обумовлює необхідність поєднання моніторингу із заходами ремедіації, екологічної безпеки та цивільного захисту.

2. Проаналізовано проби донних відкладень та встановлено неоднорідний характер забруднення. Найбільш пріоритетними забруднювачами визначено Pb, Zn, Cd та Ni, рухомі форми яких перевищували нормативний рівень у досліджених пробах. Найбільше одиничне перевищення встановлено для Zn у пробі №2 (Балабине) – 5,38 ГДК, тоді як максимальні значення Pb, Cd та Ni зафіксовано у пробі №3 (Кушугум) – відповідно 4,11; 2,54 та 2,24 ГДК. Рухомі форми Cu та Co не перевищували ГДК.

3. Розрахунок необхідного зниження концентрацій до рівня ГДК показав, що для пріоритетних металів воно становить до 81,4 %. Найвищий рівень зниження необхідний для Zn у пробі №2.

4. Проведено інтегральну оцінку за сумарним показником забруднення, що підтвердило певну неоднорідність рівня забруднення. Найвище значення встановлено для проби №3 у Кушугумі – 8,56, далі – для проби №2 у Балабиному (8,02) та проби №4 у Кушугумі (7,16). Для проб №1 та №5 значення становили відповідно 4,83 та 4,28. На основі отриманих результатів запропоновано пріоритетність досліджених ділянок для відповідних заходів ремедіації.

5. Показано, що для осушеного Каховського водосховища доцільно розглядати комбіновану систему ремедіації, яка поєднує фітостабілізацію для зменшення рухомості та вторинної міграції металів із фітоекстракцією для поступового їх вилучення.

6. Запропоновано зонування території за пріоритетністю безпеки населення та цивільного захисту та показано, що для ділянок високого пріоритету доцільними є посилений моніторинг, екоаналітичний контроль, спостереження за факторами міграції забруднювачів та своєчасне попередження населення про потенційні ризики.

Перелік посилань

1. Hryshchenko, O., Palamarchuk, R., Tsyhanov, I., Syrovatko, V., & Yatsenko, Y. (2024). Content of heavy metals in bottom sediments of drained Kakhovka Reservoir. *Agroecological journal*, (1), 53–65. https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2024.299939
2. Spears, B. M., Harpham, Q., Brown, E., Barnett, C. L., Barwell, L., Collell, M. R., Davison, M., Dixon, H., Elliott, J. A., Garbutt, A., Hazlewood, C., Hofmann, B., Lanyon, J., Lofts, S., MacKechnie, C., Medinets, S., Noble, J., Ramsbottom, D., Redhead, J. W., ... Wood, M. D. (2024). A rapid environmental risk assessment of the Kakhovka Dam breach during the Ukraine conflict. *Nature Ecology & Evolution*. https://doi.org/10.1038/s41559-024-02373-0
3. Ліщенко, Л. П., & Філіпович, В. Є. (2024). Оперативний супутниковий геомоніторинг наслідків руйнування греблі Каховської гідроелектростанції. *Ukrainian journal of remote sensing*, *11*(1), 14–20. https://doi.org/10.36023/ujrs.2024.11.1.257

4. Kvach, Y., Stepien, C. A., Minicheva, G. G., & Tkachenko, P. (2025). Biodiversity effects of the Russia–Ukraine War and the Kakhovka Dam destruction: ecological consequences and predictions for marine, estuarine, and freshwater communities in the northern Black Sea. *Ecological Processes*, *14*(1). https://doi.org/10.1186/s13717-025-00577-1
5. Voitenko, Y. V., & Svyrydova, K. S. (2025). Undermining of Kakhovka HPP: environmental consequences and remediation of damaged territories. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University series "Ecology"*, (32), 110–123. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-32-08
6. Voitenko, Y. V., & Piskun, Y. R. (2025). Ecocide: ecological consequences and possibilities of using phytoremediation for disturbed areas. *Visnyk of V N Karazin Kharkiv National University series "Ecology"*, 199. https://doi.org/10.26565/1992-4259-2025-33-14
7. *Study Reveals High Levels of Heavy Metal Contamination at Former Kakhovka Reservoir Bed – Ukrainian Nature Conservation Group*. (б. д.). Ukrainian Nature Conservation Group. https://uncg.org.ua/en/high-levels-heavy-metal-contamination-at-former-kakhovka-reservoir-bed/
8. *Water at war: the long-term environmental consequences of the destruction of the Kakhovka Dam in Ukraine | IGB*. (б. д.). Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB). https://www.igb-berlin.de/en/news/water-war-long-term-environmental-consequences-destruction-kakhovka-dam-ukraine
9. Jiang, D., Khokhlov, V., Tuchkovenko, Y., Kushnir, D., Ovcharuk, V., Spyrakos, E., Stanica, A., Slabakova, V., & Tyler, A. (2025). The biogeochemical response of the north-western Black Sea to the Kakhovka Dam breach. *Communications Earth & Environment*, *6*(1). https://doi.org/10.1038/s43247-025-02153-z
10. *Про затвердження Державних санітарних правил планування та забудови населених пунктів*. (б. д.). Офіційний вебпортал парламенту України. https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0379-96#Text
11. Silich, I. (2015). Buffer properties of soils as an indicator of edaphotopes contamination by heavy metals of Kryvyi Rih urboecosystem. *Agroecological journal*, (3), 65–68. https://doi.org/10.33730/2077-4893.3.2015.317694
12. Дацько, О. М., & Яценко, В. М. (2024). Сучасні методи ремедіації ґрунтів. Фіторемедіація як ключ до очищення ґрунтів та збереження екосистем. *Аграрні інновації*, (25), 20–24. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2024.25.3
13. Samokhvalova, V., Fateev, A., Zuza, S., Pogromska, Y., Zuza, V., Panasenko, Y., & Gorpinchenko, P. (2015). Phytoremediation of technologically polluted soils. *Agroecological journal*, (1), 92–100. https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2015.272192
14. Мазур, О. В. (2026). Наукове обґрунтування доцільності використання соняшнику (helianthus annuus l.) для фіторемедіації ґрунтів, забруднених важкими металами. *Аграрні інновації*, (35), 182–189. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2026.35.27
15. Martynova, N., & Kolombar, T. (2025). Phytoremediation technologies promising for the restoration of agricultural lands damaged by military actions. *Regulatory Mechanisms in Biosystems*, *16*(3), Стаття e25155. https://doi.org/10.15421/0225155
16. Zhylina, M., Zarina, L., Miroshnychenko, D., Lysenko, L., & Karnozhytskyi, P. P. (2025). Phytoremediation of war-induced heavy metal soil contamination using humates from Ukrainian brown coal. *Mechanization in Agriculture & Conserving of the Resources, 69*(3), 70–72. https://stumejournals.com/journals/am/2025/3/70
17. Yan, A., Wang, Y., Tan, S. N., Mohd Yusof, M. L., Ghosh, S., & Chen, Z. (2020). Phytoremediation: A Promising Approach for Revegetation of Heavy Metal-Polluted Land. *Frontiers in Plant Science*, *11*. https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00359
18. Shumilova, O., Sukhodolov, A., Osadcha, N., Oreshchenko, A., Constantinescu, G., Afanasyev, S., Koken, M., Osadchyi, V., Rhoads, B., Tockner, K., Monaghan, M. T., Schröder, B., Nabyvanets, J., Wolter, C., Lietytska, O., van de Koppel, J., Magas, N., Jähnig, S. C., Lakisova, V., ... Grossart, H. P. (2025). Environmental effects of the Kakhovka Dam destruction by warfare in Ukraine. *Science*, *387*(6739), 1181–1186. https://doi.org/10.1126/science.adn8655

ABSTRACT

Purpose. To assess the level of heavy metal contamination in the bottom sediments of the drained Kakhovka Reservoir, identify priority areas based on the level of environmental hazard, and substantiate remediation measures in compliance with environmental safety requirements.

The methods. The study is based on the results of laboratory analysis of bottom sediment samples from the drained Kakhovka Reservoir. An independent analysis of the sediment contamination level was conducted, an assessment based on the cumulative pollution index was performed, sites were ranked according to remediation priority, and the required reduction in heavy metal concentrations to meet regulatory standards was determined.

Findings. Laboratory analysis of five composite bottom sediment samples revealed a heterogeneous pattern of contamination by mobile forms of heavy metals. The most significant exceedances of regulatory limits were recorded for Pb, Zn, Cd, and Ni, whereas concentrations of mobile forms of Cu and Co did not exceed the maximum permissible concentrations. Calculations regarding the reduction required to meet these limits indicated that, for certain metals, a decrease of 49.7–81.4% is necessary. An integrated assessment based on the cumulative pollution index made it possible to identify the sites with the highest levels of contamination: samples No. 3 (Kushuhum), No. 2 (Balabyne), and No. 4 (Kushuhum). Based on the results obtained, the studied sites were ranked according to remediation priority, and the directions for measures aimed at reducing environmental risks and restoring the area were determined.

The originality. The approach to the comprehensive assessment of the environmental status of the drained bottom sediments of the Kakhovka Reservoir has been improved by combining the assessment of mobile heavy metal content, the integral determination of pollution levels, the spatial ranking of sites, and the calculation of the required reduction in concentrations to meet regulatory standards.

Practical implementation. The proposed approach makes it possible to identify priority areas of the drained reservoir for remediation measures and to select them based on the level and nature of contamination. The results obtained can be used to plan restoration activities for the territory of the former Kakhovka Reservoir, limit the migration of heavy metals, and prevent the secondary spread of pollutants.

Keywords: *Kakhovka Reservoir, bottom sediments, heavy metals, mobile metal forms, cumulative pollution index, environmental risks, remediation, technogenic-environmental safety, civil protection.*

дата першого надходження статті до видання	14.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	28.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. Y. Voitenko, T. Rusakova, O. Zolotko, O. Dolzhenkova, O. Gunko
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.