

## ЕКОЛОГІЧНА БЕЗПЕКА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-31-02>

УДК (UDC): 504.064.3:546.3/.8 (477.54)

**В. Л. БЕЗСОННИЙ**, канд. техн. наук, доц.,  
доцент кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти  
e-mail: [bezsonnyi@karazin.ua](mailto:bezsonnyi@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>

*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна*

*Харківський національний економічний університет імені С. Кузнеця,  
пр. Науки, 9а, м. Харків, 61166, Україна*

**А. Н. НЕКОС**, д-р географ. наук, проф.,  
завідувачка кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти  
e-mail: [nekos@karazin.ua](mailto:nekos@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>

*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна*

**О. О. ГОЛОЛОБОВА**, канд. с.-г. наук, доц.,  
доцент кафедри екологічного моніторингу та заповідної справи  
e-mail: [elena.gololobova@karazin.ua](mailto:elena.gololobova@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5558-2114>

*Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,  
майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна*

### ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОГО РИЗИКУ ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ

**Мета.** Оцінка екологічного ризику забруднення ґрунтів важкими металами, аналіз їх концентрації на природоохоронних територіях Зміївської громаді Харківської області та в зоні впливу Зміївської ТЕС.

**Методи.** Польові, атомно-абсорбційної спектрофотометрії, для оцінки екологічного ризику використано методику Хакансона, яка включає розрахунок коефіцієнтів забруднення (Cif), індексів потенційного екологічного ризику (Eir) та сукупного ризику (RI).

**Результати.** Дослідження базувалося на відборі проб ґрунту з чотирьох локацій: ботанічні заказники «Цикалове», «Мохначанський», «Скрипаївський» та район поблизу Зміївської ТЕС. Концентрації важких металів у ґрунтах локацій природоохоронного фонду не перевищували ГДК, за винятком підвищеного вмісту цинку та заліза. В пробах ґрунту біля Зміївської ТЕС відзначено суттєве перевищення фонових рівнів важких металів: заліза, міді, кобальту та цинку. Індеси сукупного ризику (RI) для локацій природоохоронного фонду визначено на рівні слабого екологічного ризику ( $RI < 4$ ), для району Зміївської ТЕС цей показник значно вищий ( $RI = 25,98$ ), що свідчить про підвищений ризик. Найбільший індекс потенційного ризику (Eir) пов'язаний із вмістом кобальту та кадмію.

**Висновки.** Забруднення ґрунтів важкими металами в Зміївській громаді має локалізований характер, найбільш небезпечні концентрації спостерігаються поблизу Зміївської ТЕС. Природоохоронні території мають незначний ризик забруднення, однак високий рівень біодоступності цинку та інших металів вказує на необхідність постійного моніторингу. Методика Хакансона довела ефективність у визначенні ризику для здоров'я через вплив важких металів. Результати підкреслюють необхідність заходів із зменшення впливу техногенних забруднень, таких як контроль за викидами, рекультивация ґрунтів та зниження антропогенного навантаження.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** важкі метали, екологічний ризик, ґрунт, метод Хакансона, ботанічний заказник, Зміївська ТЕС

**Як цитувати:** Безсонний В. Л., Некос А. Н., Гололобова О. О. Оцінка екологічного ризику забруднення ґрунтів важкими металами. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2024. Вип. 31. С. 20 – 34. DOI: <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-31-02>

**In cites:** Bezsonnyi, V. L., Nekos, A. N., & Gololobova, O. O. (2024). Assessment of ecological risk of soil contamination by heavy metals. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series Ecology*, (31), 20 – 34. <https://doi.org/10.26565/1992-4259-2024-31-02>

© Безсонний В. Л., Некос А. Н., Гололобова О. О., 2024



This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

## Вступ

Забруднення ґрунтів важкими металами є однією з найбільш актуальних екологічних проблем сучасності, особливо в умовах інтенсивної урбанізації та розвитку промисловості. Ґрунти відіграють ключову роль у функціонуванні екосистем, забезпечуючи продуктивність агроландшафтів, регуляцію біогеохімічних циклів та підтримання біорізноманіття. Однак накопичення важких металів у ґрунтового покриві створює значні ризики для навколишнього середовища та здоров'я людини, оскільки ці токсичні елементи мають здатність до біоаккумуляції, міграції у харчових ланцюгах і тривалого збереження у ґрунтових системах. Основними джерелами забруднення ґрунтів важкими металами є промислові викиди, автотранспорт, сільськогосподарська діяльність, неправильне поводження з відходами та природні геохімічні процеси. Ці метали, зокрема свинець, кадмій, мідь, цинк, хром, не тільки змінюють фізико-хімічні властивості ґрунту, але й негативно впливають на стан рослинності, якість водних ресурсів та здоров'я людей, які контактують із забрудненим середовищем.

Особливої уваги заслуговує оцінка екологічного ризику, пов'язаного із забрудненням ґрунтів важкими металами, яка дозволяє кількісно визначити рівень потенційної загрози для екосистем і населення. У таких дослідженнях важливо застосовувати інтегративні підходи, що включають лабораторний аналіз вмісту металів, розрахунок екологічних індексів та моделювання розподілу забруднювачів.

Дослідження стану ґрунтів в Україні часто фокусується на моніторингу ґрунтової якості та створенні умов для її збереження. Наприклад, розробка Червоної книги ґрунтів України є перспективним інструментом збереження унікальних ґрунтів у регіонах зі значним впливом господарської діяльності [1]. Наукові праці останніх років висвітлюють методика оцінки ґрунтових ресурсів. До них належать фізико-хімічний аналіз ґрунтових зразків, визначення вмісту токсичних речовин, органічного вуглецю та інші показники, що характеризують екологічний стан земель [1]. Аналіз цих параметрів є основою для виявлення деградаційних процесів, таких як засолення, ерозія та забруднення важкими металами. На основі літературних джерел, сучасні методи оцінки включають використання геоінформаційних систем (ГІС) для картування деградаційних процесів та

прогнозування змін у стані ґрунтів. Особливий інтерес становлять дослідження щодо змін гумусного горизонту та накопичення токсичних елементів в урбанізованих зонах.

Методи моніторингу стану ґрунтів значно розвинулися завдяки впровадженню сучасних технологій. Наприклад, використання дистанційного зондування та спектрального аналізу дозволяє оперативно оцінювати рівень забруднення токсичними елементами та вуглеводнями [2]. Авторами досліджено використання технологій дистанційного зондування та близькоспектрального аналізу для виявлення ґрунтових забруднень. Основні переваги цих методів включають можливість масштабного моніторингу та швидкого виявлення контамінацій, таких як токсичні елементи і нафтові вуглеводні. Дослідження також показує, що комбінування спектральних даних із геоінформаційними системами (ГІС) підвищує точність оцінок. Це актуально для Харкова, де можливі великі площі техногенного забруднення.

Крім того, аналіз даних моніторингу з використанням моделей прогнозування антропогенних впливів сприяє підвищенню ефективності заходів із відновлення ґрунтів. Важливо також розглянути локальні підходи до екологічного моніторингу ґрунтів у межах урбанізованих територій. Наприклад, у містах особливу увагу приділяють забрудненню важкими металами та органічними сполуками, що зумовлене промисловою та транспортною діяльністю [3]. Дослідження розглядає роль ґрунтів як індикаторів екологічного стану урбанізованих систем. Описано методи екологічного моніторингу, які базуються на класифікації типів ґрунтів за рівнем забруднення. Особливо цінним є акцент на важких металах і органічних сполуках як основних забруднювачах, що відповідає проблемам індустріальних регіонів. Для ефективного управління даними використовуються геоінформаційні системи, які дозволяють створювати інтерактивні карти забруднення [4]. У статті описується використання ГІС для управління даними про ґрунтове забруднення. Це дозволяє створювати інтерактивні карти, які надають інформацію про просторовий розподіл забруднень і сприяють прийняттю рішень щодо екологічного управління. Інструмент також використовується для моделювання сценаріїв і планування відновлювальних заходів.

Окрім технологічних рішень, важливим є розуміння екологічного впливу забруднювачів. Наприклад, використання пестицидів у сільському господарстві викликає накопичення нітратів, важких металів та органічних сполук, що впливає на здоров'я екосистем та якість продукції [5]. Стаття аналізує вплив пестицидів на ґрунтову екологію. Методологія включає визначення нітратів, нітритів та важких металів у ґрунтових зразках. Дослідження демонструє, як інтенсивне сільське господарство сприяє накопиченню токсичних речовин, що може бути релевантним для аналізу околиць Харкова, де ведеться активна аграрна діяльність.

На основі сучасних методів моніторингу та аналізу можна розробляти ефективні стратегії для покращення екологічного стану ґрунтів. Наприклад, інтеграція методів дистанційного зондування, аналізу даних великих обсягів та дронів сприяє точній ідентифікації забруднень і розробці заходів для їх усунення [6]. Дослідження зосереджене на інтеграції технологій UAV (дрони), великих даних і дистанційного зондування для оцінки ґрунтових забруднень. Запропоновані підходи включають моделювання та прогнозування забруднень, що дозволяє визначати джерела забруднення і розробляти ефективні заходи з відновлення.

У дослідженні [7] проведено бібліометричний аналіз тенденцій у науці про ґрунти за період 1999–2013 років. Значна увага приділена моніторингу забруднень важкими металами та використанню сучасних технологій, таких як дистанційне зондування. Це дослідження пропонує основи для глобальної екологічної політики та інноваційних підходів до управління ґрунтами.

Аналізується інтеграція технологій великих даних і аерофотознімання для моніторингу ґрунтового забруднення [8] з використанням статистичного аналізу і моделювання; автори розробили підходи до управління екологічними ризиками, які є перспективними для широкомасштабного застосування.

Дослідження [9] зосереджує увагу на моніторингу природного капіталу ґрунтів та екосистемних послуг. Автори обговорюють довгострокові програми, що включають екологічні показники і забруднювачі, забезпечуючи основу для управління ґрунтами в міжнародному контексті.

У роботі [10] аналізується забруднення ґрунтів у різних типах землекористування. Результати сприяють підтримці проектів із

відновлення чистоти ґрунтів та екологічних ініціатив, забезпечуючи дані для прийняття рішень у регіональних екосистемах.

Використання дистанційного зондування для моніторингу ґрунтових забруднень на великих територіях є головною темою цього дослідження. Автори [11] підкреслюють важливість супутникових даних і спектральних методів для виявлення токсичних елементів. У дослідженні [12] описується технологія розподіленого зондування для аналізу забруднювачів. Метод забезпечує точне оцінювання стану ґрунтів і може бути використаний для вирішення проблем забруднення на місцевому та глобальному рівнях. Дослідження [13] аналізує профілі ґрунтового забруднення з 2000 по 2013 роки, визначаючи основні підходи та тенденції у моніторингу. Акцент зроблено на шість основних напрямів досліджень і журнали, які слугують платформами для обговорення.

Дослідження впливу промислової діяльності на екологічні функції ґрунтів демонструє, що такі фактори, як ущільнення, значно погіршують екосистемні послуги ґрунту. Для оцінки стану ґрунту використовуються біологічні індикатори, що дозволяють виявити негативні наслідки та ефективність рекультивациі [14]. Результати аналізу ґрунтів у сільськогосподарських районах свідчать про низьку родючість та кислотність, що вказує на деградацію ґрунтів. Водночас консерваційні методи, зокрема мінімальна обробка ґрунту, сприяють відновленню його екологічного стану [15]. Національний моніторинг здоров'я ґрунтів у Великобританії включає кластерний аналіз показників якості ґрунту, таких як фізико-хімічні властивості та функціональна класифікація ґрунтів. Виявлено, що управління використанням землі значно впливає на показники здоров'я ґрунтів [15].

Дослідження хімічних властивостей ґрунтів показало вплив важких металів, таких як кадмій і ртуть, на екологічний стан. Незважаючи на помірний рівень екологічного ризику, рекомендовано активізувати заходи з управління вмістом токсичних елементів [17]. Сезонні варіації параметрів ґрунту, таких як рН, провідність, вміст органічної речовини, підкреслюють динамічний характер змін екологічного стану ґрунтів у сільськогосподарських ландшафтах [18]. Аналіз фізичних якостей ґрунтів показав, що багаторівневі агролісівничі системи сприяють відновленню якості ґрунтів на деградованих землях. Методика оцінки структури ґрунтів VESS

виявила ефективність такого підходу [19]. Дослідження ґрунтів у районах з різним використанням показало, що управлінські практики, зокрема інтегровані системи рослинництва і тваринництва, значно впливають на фізико-хімічні властивості ґрунтів [20]. Останні роботи підкреслюють необхідність інтегрованих заходів щодо управління ґрунтами для збереження їхньої родючості та забезпечення сталого розвитку. Це включає аналіз змін хімічного складу та використання адаптивних систем управління [22].

Важкі метали, з одного боку, є незамінними природними ресурсами, а з іншого — становлять серйозну екологічну загрозу через їхнє швидке накопичення внаслідок техногенної діяльності. Вони мають високу здатність до зв'язування з органічними речовинами, що може спричинити їхню інактивацію. Навіть невеликі кількості цих металів здатні викликати важкі захворювання, зокрема онкологічні та імунні розлади, а також уповільнювати ріст і розвиток організмів через порушення метаболізму. У сільському господарстві це призводить до зниження врожайності та погіршення якості продукції. Важкі метали зазвичай потрапляють у харчові ланцюги через рослини, які поглинають їх із

забруднених ґрунтів, що актуалізує питання агроекологічного моніторингу, особливо в зонах із високою рослинною складовою раціону. Перевищення навіть природних концентрацій цих речовин у ґрунті значно ускладнює оцінювання його екологічного стану. Для якісного моніторингу докільля слід враховувати не лише кількість токсичних елементів, а й їхній вплив на біоценози, наприклад, зміни в структурі мікробних співтовариств, які проявляються вже при низьких рівнях забруднення, не характерних для високих концентрацій [23–27].

Актуальність роботи визначається необхідністю моніторингу й оцінки забруднення ґрунтів у зв'язку зі зростаючим антропогенним впливом, зокрема в урбанізованих районах та промислових зонах. Проведення таких досліджень є важливим етапом у розробці природоохоронних заходів, спрямованих на мінімізацію негативного впливу важких металів та забезпечення сталого розвитку територій.

Мета роботи – оцінка екологічного ризику забруднення ґрунтів важкими металами, аналіз їх концентрації на природоохоронних територіях Зміївської громаді Харківської області та в зоні впливу Зміївської ТЕС.

### Об'єкти та методи дослідження

Аналіз екологічного стану ґрунтів Зміївської громади базувався на даних про вміст важких металів, отриманих із матеріалів Національного наукового центру «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О. Н. Соколовського» та Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Дослідження охоплювали природно-заповідні території громади та зону впливу Зміївської ТЕС [28, 29].

Відбір проб здійснювався у таких локаціях:

Скрипаївський заказник – територія з унікальними сосновими насадженнями віком понад 150 років, розташована на пісках надзаплавної тераси р. Сіверський Донець.

Ботанічний заказник "Цикалове" – заповідна територія площею 10 га на лівобережній заплаві р. Сіверський Донець поблизу с. Лісове. Характеризується унікальним ландшафтом, який включає заплаву, озера, болотисті ділянки та реліктові види рослин, такі як латаття біле, глечики жовті, косаріки тонкі.

Ботанічний заказник "Мохначанський" – лісовий об'єкт площею 104,9 га із дубовими насадженнями віком понад 170 років. Цінність території полягає у збереженні природної рівноваги та вивченні відтворення корінних лісів.

Територія поблизу Зміївської ТЕС – відбір проб здійснено на відстані 2 км на північний схід від джерела забруднення.

Зразки ґрунту відбиралися відповідно до стандарту ДСТУ 4287:2004 «Якість ґрунту. Відбирання проб». Розмір площі відбору становив 50 м<sup>2</sup>. Глибина відбору проб для локацій 1–3 складала 0–10 см та 10–20 см, а для локації 4 – 0–20 см.

Аналіз зразків із природно-заповідних територій (локації 1–3) виконували в лабораторії охорони ґрунтів від техногенного забруднення ННЦ «Інститут ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н. Соколовського». Проби з четвертої локації досліджували в хіміко-аналітичній лабораторії Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна. Визначення рухомих форм важких металів

( *Cd, Cr, Co, Fe, Cu, Mn, Pb, Ni, Zn* ) проводили у буферній амонійно-ацетатній витяжці (рН 4,8) із застосуванням методу атомно-абсорбційної спектрофотометрії.

Оцінка екологічного ризику для здоров'я, зумовленого вмістом важких металів, здійснювалася за моделлю Хакансона [30–32]. Методика включає такі етапи:

Обчислення коефіцієнта забруднення ( $C_{if}$ ):

$$C_{if} = \frac{C_i}{C_n}$$

де  $C_i$  — концентрація важкого металу  $i$ , визначена у ґрунті (мг/кг),

$C_n$  — нормативний показник для цього металу (мг/кг).

Розрахунок індексу потенційного екологічного ризику ( $E_{ir}$ ):

$$E_{ir} = T_i \cdot C_{if}$$

де  $T_i$  — коефіцієнт токсичності важкого металу  $i$ .

Розрахунок сукупного індексу екологічного ризику (RI):

$$RI = \sum_{i=1}^m (T_i \cdot C_{if})$$

де  $m$  — кількість металів, що оцінюються.

Значення коефіцієнтів токсичності для металів приймаються такими:  $Cd = 30, As = 10, Cu = Ni = Pb = 5, Cr = 2, Mn = Zn = 1$  [37].

Цей підхід застосовується для визначення ступеня забруднення ґрунтів важкими металами та оцінювання можливого екологічного ризику, що дозволяє розробляти ефективні заходи для захисту та реабілітації уражених територій.

Таблиця 1

**Критерії оцінки екологічного ризику**

Table 1

**Criteria for assessing environmental risk**

Значення ризику	Характеристика величини ризику
$E_{ir} < 40$	слабко виражений потенційний ризик,
$40 \leq E_{ir} < 80$	середньо виражений потенційний ризик,
$E_{ir} \geq 80$	сильно виражений потенційний ризик.
$RI < 150$	слабко виражений сукупний ризик,
$150 \leq RI < 300$	середньо виражений сукупний ризик,
$RI \geq 300$	сильно виражений сукупний логічний ризик.

**Результати та обговорення**

Значну стурбованість викликає забруднення важкими металами атмосфери, ґрунтів та водних ресурсів. Це явище не лише суттєво знижує врожайність культур і призводить до руйнування природних рослинних екосистем, але й негативно впливає на формування органів рослин, а також погіршує екологічні умови, в яких мешкають люди. Забруднення також становить серйозну загрозу здоров'ю людини, викликаючи погіршення загального стану, збільшення частоти ендокринних розладів та метаболічних порушень. Ризики залежать від типу й рівня токсичності металів, що потрапляють в організм. Важкі метали мають властивості протоплазматичних отрут, токсичність яких підвищується зі збільшенням атомної маси. Вони впливають на організми різними шляхами: наприклад, мідь, ртуть, свинець, берилій та кадмій у високих концентраціях пригнічують активність

ферментів. Інші метали, такі як алюміній, барій або залізо, утворюють хелатні комплекси з метаболітами, порушуючи метаболічні процеси. Крім того, кадмій, мідь та залізо (II) можуть взаємодіяти з клітинними мембранами, змінюючи їх структуру та проникність, що інколи призводить до руйнування мембран. Деякі метали здатні витісняти необхідні для рослин елементи, порушуючи їхню життєдіяльність. Наприклад, кадмій витісняє цинк, що спричиняє його дефіцит і, як наслідок, руйнування рослинних організмів і їхню загибель [28]. Важкі метали потрапляють в атмосферу як через природні процеси (вивітрювання, лісові пожежі, вулканічну активність, випари рослин, морську піну), так і внаслідок антропогенних факторів (гірничодобувна діяльність, металургія, спалювання палива, утилізація відходів, виробництво фосфорних добрив тощо). Природні джерела переважно

спричиняють потрапляння в атмосферу пилу, який становить понад 80 % нікелю, 60 % міді й свинцю, а також 55 % цинку. Однак порівняно з антропогенними впливами їхня значущість значно менша. Основними джерелами антропогенного забруднення атмосфери є теплові електростанції (27 %), чорна металургія (24,3 %), нафтова промисловість (15,5 %), транспорт (13,1 %), кольорова металургія (10,5 %), а також видобуток і обробка будівельних матеріалів (8,1 %) [28].

Ґрунт є основним компонентом біосфери, що відіграє вирішальну роль у забезпеченні життєдіяльності на Землі. Він взаємодіє з циклами геологічних і біологічних процесів, виконуючи функції природного фільтру для регуляції переміщення хімічних елементів та енергії між літосферою, гідросферою, атмосферою і живими організмами.

Наукові дослідження [33, 34] свідчать, що забруднення ґрунтів важкими металами має локалізований характер і зазвичай спостерігається у районах, прилеглих до великих промислових центрів, таких як підприємства хімічної або металургійної промисловості, а також поблизу енергетичних об'єктів та

автомобільних доріг із інтенсивним рухом. Якщо раніше вважалося, що забруднення зменшується завдяки розсіюванню, сучасні роботи [35] вказують на суттєве перевищення природних показників важких металів у ґрунтах на значній відстані від джерел забруднення. Це призводить до накопичення токсичних елементів у сільськогосподарській продукції, яка часто перевищує встановлені нормативи за вмістом металів.

Дослідження показали, що концентрації хімічних елементів (*Cr, Cd, Co, Mn, Cu, Fe, Pb,*

*Ni, Zn*) у ґрунтах заповідних зон заказників «Цикалове», «Мохначанський» та «Скрипаївський», а також у районі Зміївської теплоелектростанції, перебувають у межах нормативів ГДК (табл. 2) [28, 29]. У локаціях 1–3 ґрунтові зразки збиралися на глибинах 0–10 см та 10–20 см, а у локації 4 – на глибинах 0–20 см.

Для коректного співставлення отриманих даних розраховано усереднені значення для локацій 1–3. ГДК хімічних елементів регламентовані наказом Міністерства охорони здоров'я України № 1595 від 14 липня 2020 року [36].

Таблиця 2

Вміст важких металів, мг/кг (на основі даних [28, 29])

Table 2

Heavy metal content, mg/kg (based on data [28, 29])

Метал	Мохначанський	Цикалове	Скрипаївський	ТЕС	Норматив	Фонове
Ni	0.065	0.010	0.105	2.700	4.000	1.000
Pb	1.005	0.755	1.235	0.930	32.000	0.500
Fe	6.925	0.295	47.010	7.400	0.000	2.000
Mn	3.980	1.585	4.490	5.240	1500.000	43.000
Zn	1.380	0.230	0.245	5.300	23.000	1.000
Cr	0.010	0.025	0.295	0.060	6.000	1.000
Cu	0.045	0.260	0.190	2.400	3.000	0.500
Cd	0.010	0.010	0.010	0.160	1.500	0.000
Co	0.440	0.460	0.405	2.500	5.000	0.500

Ґрунти класифікуються як забруднені важкими металами, якщо концентрація токсичних елементів перевищує природний рівень у два-три рази. Згідно з проведеними дослідженнями, у ґрунтах природоохоронних територій «Мохначанський», «Цикалове» та «Скрипаївський» виявлено надлишковий вміст цинку, тоді як у «Мохначанському» та «Скрипаївському» зафіксовано підвищені рівні заліза, а у «Скрипаївському» – хрому. Особливо широке поширення забруднення

цинком пояснюється його здатністю до техногенного розсіювання, утворюючи зони впливу, що можуть простягатися на відстань до 25 км залежно від рівня викидів.

На території Зміївської теплоелектростанції у ґрунтах зафіксовано перевищення природного рівня важких металів: концентрація цинку перевищує норму у 3,77 рази, кобальту – у 2,9, заліза – у 4,22, а міді – у 3,47 рази. Вміст свинцю, нікелю та алюмінію також дещо перевищує природні показники.

Важкі метали характеризуються високою токсичністю, тривалим збереженням у ґрунті та біодоступністю. Їх відносять до основних шкідливих мікроелементів. Надмірна їх концентрація в ґрунтовій матриці призводить до зниження його якості, що негативно впливає на продуктивність ґрунту. Крім того, накопичення токсичних елементів становить ризик для здоров'я людини. Наприклад, вплив миш'яку (як гострий, так і хронічний) може спричинити серцево-судинні захворювання та інші системні порушення. Забруднення ґрунтів важкими металами стало однією з найгостріших екологічних проблем у багатьох регіонах світу.

Розрахунок рівня ризику виконувався за формулами (1)–(3), використовуючи

нормативи ГДК з [24] та дані про токсичність металів з [30] (табл. 3). Оскільки для заліза відсутні нормативні значення ГДК і токсичності у ґрунті, цей елемент не враховувався у розрахунках.

Розрахунок ризику для здоров'я, пов'язаного з впливом важких металів, виконаний згідно з формулами (1)–(3), показав наступні результати [37].

У табл. 4 наведено значення ризику для території "Цикалове". Сумарний показник RI становить 3.6067490, що свідчить про відносно низький рівень ризику. Серед усіх металів особливу увагу привертають кобальт і нікель, які демонструють вищі значення  $E_{i_r}$  у порівнянні з іншими елементами.

Таблиця 3

Нормативні значення та токсичність для важких металів

Table 3

Standard values and toxicity for heavy metals

Метал	Норматив, $C_n$ , мг/кг	Токсичність, $Tr_i$
Ni	4.0	5
Pb	32.0	5
Mn	1500.0	2
Zn	23.0	1
Cr	6.0	2
Cu	3.0	5
Cd	1.5	30
Co	5.0	30

Таблиця 4

Розрахунок ризику для заказника «Цикалове»

Table 4

Risk calculation for the Tsikalovye reserve

Метал	Вміст, мг/кг	Коефіцієнт забруднення, $C_{i_f}$	Індекс потенційного ризику, $E_{i_r}$
Ni	0.010	0.002500	0.075
Pb	0.755	0.023594	0.118
Mn	1.585	0.001057	0.002
Zn	0.230	0.010000	0.010
Cr	0.025	0.004167	0.008
Cu	0.260	0.086667	0.433
Cd	0.010	0.006667	0.200
Co	0.460	0.092000	2.760
Індекс сукупного потенційного ризику, $RI$			<b>3.607</b>

Результати розрахунків для заказника "Мохначанський" представлені у табл. 5. Загальний індекс ризику ( $RI$ ) складає 3.4656710. Як і для попередньої локації, найбільш небезпечним металом є кобальт.

У таблиці 6 представлені результати розрахунків для локації "Скрипаївський". Сукупний потенційний індекс ризику ( $RI$ ) дорівнює 3.7796080. Як і на інших локаціях, кобальт демонструє високий показник  $Eir$ .

Розрахунок ризику для заказника «Мохначанський»

Таблиця 5

Risk calculation for the Mokhnachansky reserve

Table 5

Метал	Вміст, мг/кг	Коефіцієнт забруднення, $C_{if}$	Індекс потенційного ризику, $E_{ir}$
Ni	0.065	0.016250	0.325
Pb	1.005	0.031406	0.157
Mn	3.980	0.002653	0.005
Zn	1.380	0.060000	0.060
Cr	0.010	0.001667	0.003
Cu	0.045	0.015000	0.075
Cd	0.010	0.006667	0.200
Co	0.440	0.088000	2.640
Індекс сукупного потенційного ризику. $RI$			<b>3.466</b>

Розрахунок ризику для заказника «Скрипаївський»

Таблиця 6

Risk calculation for the Skrypaivskiy reserve

Table 6

Метал	Вміст, мг/кг	Коефіцієнт забруднення, $C_{if}$	Індекс потенційного ризику, $E_{ir}$
Ni	0.105	0.026250	0.525
Pb	1.235	0.038594	0.193
Mn	4.490	0.002993	0.006
Zn	0.245	0.010652	0.011
Cr	0.295	0.049167	0.098
Cu	0.190	0.063333	0.317
Cd	0.010	0.006667	0.200
Co	0.405	0.081000	2.430
Індекс сукупного потенційного ризику. $RI$			<b>3.78</b>

Результати розрахунків для території "Зміївська теплоелектростанція" (табл. 7) показують суттєво підвищений ризик із  $RI$ , що дорівнює 25.977730. Високі значення  $C_{if}$  і  $E_{ir}$  для кобальту та кадмію підкреслюють їхній значний внесок у загальний потенційний ризик.

Як видно з наведених розрахунків, усі досліджувані локації відносяться до категорії «слабкий потенційний екологічний ризик» та «слабкий сукупний екологічний ризик» (табл. 8).

У багатьох територіях дослідження кобальт і нікель демонструють підвищені індекси потенційного ризику ( $E_{ir}$ ), що свідчить



Таблиця 7

Розрахунок ризику для території «Зміївська теплоелектростанція»

Table 7

Risk calculation for the territory of the Zmiiv Thermal Power Plant

Метал	Вміст металу, мг/кг	Коефіцієнт забруднення, $C_{if}$	Індекс потенційного ризику, $E_i$
Ni	2.70	0.675000	3.375
Pb	0.93	0.029063	0.145
Mn	5.24	0.003493	0.007
Zn	5.30	0.230435	0.23
Cr	0.06	0.010000	0.02
Cu	2.40	0.800000	4.00
Cd	0.16	0.106667	3.200
Co	2.50	0.500000	15.00
Індекс сукупного потенційного ризику. $RI$			<b>25.98</b>

Таблиця 8

Характеристика величин ризику у місцях дослідження

Table 8

Characteristics of risk values in the study areas

Територія	Індекс сукупного потенційного ризику, $RI$	Характеристика
Заказник «Цикалове»	3.61	слабко виражений сукупний ризик
Заказник «Мохначанський»	3.63	слабко виражений сукупний ризик
Заказник «Скрипаївський»	4.04	слабко виражений сукупний ризик
Зміївська теплоелектростанція	25.98	слабко виражений сукупний ризик

про можливу загрозу для здоров'я людини при тривалому впливі цих елементів. Зона Зміївської теплоелектростанції вирізняється особливо високими ризиками, що вимагає додаткових заходів із контролю та рекультивації. Методика оцінки ризику, розроблена на основі моделі Хакансона, дозволяє кількісно оцінити екологічний ризик через аналіз коефіцієнтів забруднення та токсичності металів. Згідно з отриманими результатами, в окремих природоохоронних зонах, таких як заказники "Цикалове", "Мохначанський" та "Скрипаївський", а також у районі Зміївської теплоелектростанції, зафіксовано суттєве перевищення

концентрацій важких металів порівняно з природними рівнями. Це створює значний ризик для здоров'я місцевого населення через тривале накопичення токсичних речовин у ґрунті та їхню біодоступність. Підвищені концентрації заліза, цинку, міді та інших металів можуть негативно впливати на продуктивність ґрунту, а також представляти загрозу для здоров'я людини через накопичення в організмі, що здатне провокувати серйозні захворювання, включаючи серцево-судинні та інші системні порушення. Зважаючи на високі значення індексу сукупного ризику (RI), зафіксовані на кількох ділянках, важливо розробити та впровадити

заходи для зниження впливу важких металів на ґрунти та здоров'я людей. Це передбачає виявлення джерел забруднення, впровад-

ження моніторингу викидів і використання сучасних технологій для очищення забруднених територій.

### Висновки

Проведене дослідження екологічного ризику забруднення ґрунтів важкими металами в межах Зміївської громади. Забруднення ґрунтів має локалізований характер, найбільш критичні концентрації важких металів виявлені поблизу Зміївської теплоелектростанції.

Ґрунти заказників «Цикалове», «Мохначанський» і «Скрипаївський» характеризуються низьким рівнем ризику, хоча на окремих ділянках зафіксовано підвищені концентрації цинку, заліза і хрому.

У районі Зміївської теплоелектростанції зафіксовано значне перевищення концентрацій заліза (в 4,22 рази), міді (в 3,47 рази),

кобальту (в 2,9 рази) та цинку (в 3,77 рази) порівняно з фоновими значеннями.

Загальний індекс сукупного ризику ( $RI$ ) в зоні впливу Зміївської теплоелектростанції становить 25,98, що вказує на високий рівень екологічного ризику. У природоохоронних зонах значення  $RI$  залишаються на рівні слабого ризику («Цикалове» — 3,61; «Мохначанський» — 3,47; «Скрипаївський» — 3,78).

Результати підкреслюють необхідність впровадження заходів щодо зниження негативного впливу техногенного забруднення. Це включає моніторинг ґрунтів, очищення забруднених територій, контроль за промисловими викидами та зменшення антропогенного навантаження.

### Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що конфлікту інтересів щодо публікації цього рукопису немає. Крім того, автори повністю дотримувались етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

### Відповідність проєкту

Дослідження виконане в межах науково-дослідної роботи № БФ/32-2022 «Виконання завдань перспективного плану розвитку наукового напрямку «Математичні науки та природничі науки» Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна».

### Список використаної література

1. Яцук І.П., Дегтярьов В.В., Тихоненко Д.Г., Горін М.О. Моніторинг ґрунтів природних та агроєкосистем як наукова основа збереження ґрунтового різноманіття. *Агроєкологічний журнал*. 2016. № 4. С.57-66. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2016.271211>
2. Gholizadeh A., Saberioon M., Ben-Dor E., & Borůvka L. Monitoring of selected soil contaminants using proximal and remote sensing techniques: Background, state-of-the-art and future perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018. Vol.48. N 3. P. 243–278. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1447717>
3. Zhukov, O., Kunakh, O., Yorkina, N., Tutova A. Response of soil macrofauna to urban park reconstruction. *Soil Ecol. Lett.* 2023. 5, 220156. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42832-022-0156-0>
4. Lv Z. Construction of soil environment information management platform based on ArcGIS. *2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. Vol.546. 032039. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/546/3/032039>
5. Tudor B., Bucevschi B. T. Analysis of the Influence of Pesticides on the Soil in an Agricultural Area. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle IX, Metallurgy and Materials Science*. 2021. 44, 4 (Dec. 2021), P. 60-66. DOI: <https://doi.org/10.35219/mms.2021.4.11>
6. Li X., Zhu W., Qin Y., Yin F. Research Progress and Prospects of Soil Pollution Assessment and Prediction Models. *2019 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2019. Vol. 304 052042 DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/5/052042>
7. Wang Mingze, Liu Dianfeng, Jia Jinglei, Zhang Xiaoyi. Global trends in soil monitoring research from 1999–2013: a bibliometric analysis. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*. 2015. Vol.65. P. 483-495. DOI: <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1030443>

8. Li X., Zhu W., Qin Y., Yin F. Research Progress and Prospects of Soil Pollution Assessment and Prediction Models. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. Vol. 340. N 5. art. no. 052042, DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/5/052042>
9. Keith A. M., Griffiths R. I., Henrys P. A., Hughes S., Lebron I., Maskell L.C. Monitoring soil natural capital and ecosystem services by using large-scale survey data. In M. Stromberger, N. Comerford, & D. Lindbo (Eds.), *Soil ecosystems services*. 2015. Madison, WI: Soil Science Society of America. DOI: <https://doi.org/10.2136/2015.soilecosystemsservices.2014.0070>
10. Zhang Z. Analysis of Soil Pollution Status in Different Land Use Types. *Frontiers in Sustainable Development*. 2023. 3, 7 (Jul. 2023), 105–109. DOI: <https://doi.org/10.54691/fsd.v3i7.5338>
11. Gholizadeh A., Saberioon M., Ben-Dor E., Borůvka L. Monitoring of selected soil contaminants using proximal and remote sensing techniques: Background, state-of-the-art and future perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2018. Vol. 48. N 3. P. 243–278. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1447717>
12. Jing Wang, Xianfeng Cheng, Qinhui Huang, Xi Ying. Analysis method of regional soil pollutants based on distributed sensing technology. *Proc. SPIE 12246, 2nd International Conference on Signal Image Processing and Communication (ICSIPC 2022)*, 2022. 1224604 (9 October 2022). DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2643704>
13. Zhou L.Y., Zuo W.G., Li Z.M., Luo C.S. Research profiling of soil pollution from 2000 to 2013. *Advanced Materials Research*, 2014. 955-959, P. 3665-3670. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.955-959.3665>
14. Дрозд О. М., Журавель М. Ю., Найдюнова О.С., Леженіна І. П., Полчанінова Н. Ю. Визначення локальних змін підтримувальної екосистемної послуги ґрунтів територій нафтогазовидобутку. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. Науково-технічний журнал* 2018. № 2 (18). С. 15–25. DOI: [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2018-2\(18\)](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2018-2(18))
15. Vashukevich N., Gusev A., Varnina V.A., Chulkov V., Fedorov A. (). Agroecological monitoring of soils in the educational and experimental farm of the Ural State Agrarian University. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2022. Vol.1043. N 1. 012020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012020>
16. Ande O., Senjobi B. (2014). Land degradation assessment of agrarian soils in Ebonyin State for sustainable production. *Journal of Ecology and the Natural Environment*. Vol. 6. N 4. P. 150–158. DOI: <https://doi.org/10.5897/JENE10.081>
17. Seaton F. M., Barrett G., Burden A., Creer S., Fitos E., Garbutt A., Robinson D. A. (). Soil health cluster analysis based on national monitoring of soil indicators. *European Journal of Soil Science*, 2020. 71(2), 278–295. DOI: <https://doi.org/10.1111/ejss.12958>
18. Huang J., Wang Y., Liu Z. R., Zhang Y. (). Evaluation on potential ecological risk of heavy metals in soil of Yanjiao. *Advanced Materials Research*, 2014. 1044-1045, 314–318. DOI: <https://doi.org/10.4028/WWW.SCI-ENTIFIC.NET/AMR.1044-1045.314>
19. Neagu A., Soceanu A., Birghila S. Analysis of soils parameters in correlation with vegetation period. *Revista de Chimie*, 2020. Vol. 71. N 9. P.326–331. DOI: <https://doi.org/10.37358/rc.20.9.8331>
20. Purnama T. J., Wijayanto N., Wasis B. Assessing soil properties in various agroforestry lands in Kuningan District, West Java, Indonesia using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). *Biodiversitas*, 2022. Vol.23. N 6. P. 3112–3120. DOI: <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230628>
21. Bono J. A., Macedo M., Tormena C. A. Qualidade física do solo em um latossolo vermelho da região sudoeste dos cerrados sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2013. Vol. 37. N 3. P. 591–599. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300021>
22. Sinore T., Chernet M., Detamo K., Yohannes M. Effect of soil management practices on soil physico-chemical properties: A case of Wera Sub-Watershed, Southern Ethiopia. *Advances in Agriculture*, 2022, Article ID 5370477. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/5370477>
23. Крайнюков О. М., Хоменко А. С., Крайнюков А. О. Еколого-токсикологічна оцінка якості ґрунтів в межах впливу нафтопереробного підприємства. *Молодий вчений*. 2020. № 1. С. 113–119. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-1-77-25>
24. Крайнюков О., Кривицька І., Найдюнова О. Еколого-токсикологічна оцінка якості ґрунтів, які знаходяться під впливом Зміївської ТЕС. *Молодий вчений*, 2023. № 12 (124), 12-16. DOI: <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2023-12-124-22>
25. Крайнюков О. М., Мірошніченко І. М., Сябрук О. М., Гладкіх Є. О. Вплив нафтового забруднення на перебіг змін властивостей чорнозему та його фітотоксичність. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2022. Вип. 57. С. 296–306. DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-22>

26. Кривицька І. А., Крайнюков О. М. Принципи та методи діагностики та моніторингу важких металів у ґрунті урбанізованих територій. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*. 2023. № 12 (146). С. 9–12. DOI: <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-12>
27. Безсонний В. Л., Некос А. Н., Огородник А. М. Важкі метали в ґрунтах мегаполісів. *Охорона довкілля: зб. наук. статей XX Всеукраїнських наукових Таліївських читань*. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. С.85-87. URL: <https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2024/12/taliev-2024.pdf>
28. Гололобова О.О., Максимова Г.А. Оцінка техногенного навантаження на природне середовище за допомогою комплексних показників забруднення. *Охорона довкілля: зб-к наук. праць VIII Всеукр. наук. Таліївських читань*. Харків. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна. 2012. С. 27–32. URL: <https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2019/11/taliev-2012.pdf>
29. Гололобова О. О., Пасько М. А. Екологічний стан ґрунтів у природоохоронних ландшафтах Зміївського району Харківської області (на прикладі лісових заказників «Мохначанський», «Скрипаївський» та ботанічного заказника «Цикалово»). *Охорона довкілля: зб. наук. статей XI Всеукр. наук. Таліївських читань*. Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2015. С. 149–153. URL: <https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2019/11/taliev-2015.pdf>
30. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*. 1980. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
31. Long Z., Huang Y., Zhang W., Shi Z., Yu D., Chen Y. et al. Effect of different industrial activities on soil heavy metal pollution, ecological risk, and health risk. *Environmental Monitoring and Assessment*. 2021. Vol. 193. N 1. P. 20. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08807-z>
32. Mohammadi A. A., Zarei A., Esmailzadeh M., Taghavi M., Yousefi M., Yousefi Z., et al. Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risks Assessment in Soils Around an Industrial Zone in Neyshabur Iran. *Biological Trace Element Research*, 2020. Vol.195. N 1. P. 343–352. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01816-1>
33. Кисіль В. І. Вплив забруднення на стан земельних ресурсів. Земельні ресурси України. Київ: Аграрна наука, 1998. С. 36-65.
34. Мірошніченко М. М. Стійкість ґрунту як основа педоекологічного нормування забруднення: автореф. дис. на здоб. наук. ступеня д-ра біол. наук: спец. 03.00.18 «Ґрунтознавство» М. Мірошніченко. Харків, 2005. 38с.
35. Фатєєв А. І. Мірошніченко М. М., Пащенко Я. В, Самохвалова В. Л. Відновлення родючості техногенного забруднення ґрунтів: Історія і сучасність ґрунтознавства і агрохімії в Україні; за ред. Б.С. Носка. Харків. 2006. С. 176-183.
36. Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті, затвердженими Наказом Міністерства охорони здоров'я України 14 липня 2020 року № 1595, Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 31 липня 2020 р. за № 722/35005. Офіційний вісник України від 18.08.2020 — 2020 р., № 64, стор. 107, стаття 2084, код акта 100354/2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>
37. Некос А. Н., Безсонний В. Л., Захарова М. А., Солдатенко М. А. Оцінка екологічного ризику, обумовленого забрудненням ґрунтів. *Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природо-користування: освіта – наука – виробництво – 2024: зб. мат. XXVI Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 17-18 квітня 2024 року)*. Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. С. 96–98. URL: [https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2024/05/tezi-xxvi\\_mezhd-konf-2024.pdf](https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2024/05/tezi-xxvi_mezhd-konf-2024.pdf)

Стаття надійшла до редакції 10.10.2024

Стаття рекомендована до друку 22.11.2024

**V. L. BEZSONNYI**, PhD (Technical), Associate Prof.,  
Associate Professor of the Department of Environmental Safety and Environmental Education  
e-mail: [bezsonny@gmail.com](mailto:bezsonny@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8089-7724>  
V. N. Karazin Kharkiv National University,  
Svobody Sq, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine  
*Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics*,  
Nauky Ave., 9a, Kharkiv, 61166, Ukraine  
**A. N. NEKOS**, DSc (Geography), Prof.,  
Head of the Department of Environmental Safety and Environmental Education  
e-mail: [alnekos999@gmail.com](mailto:alnekos999@gmail.com) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1852-0234>  
V. N. Karazin Kharkiv National University,  
Svobody Sq, 4, Kharkiv, 61022, Ukraine  
**O. O. GOLOLOBOVA**, PhD (Agriculture)  
Associate Professor of the Department of Environmental Monitoring and Protected Area  
e-mail: [elena.gololobova@karazin.ua](mailto:elena.gololobova@karazin.ua) ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5558-2114>  
V. N. Karazin Kharkiv National University,  
4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

## ASSESSMENT OF ECOLOGICAL RISK OF SOIL CONTAMINATION BY HEAVY METALS

**Purpose.** To assess the ecological risk of soil contamination by heavy metals and analyze their concentrations in protected areas in the Zmiivska community of the Kharkiv region and the impact zone of the Zmiivska TPP.

**Methods.** Field techniques, atomic absorption spectrophotometry; Hakanson methodology was applied to evaluate ecological risks, including the calculation of contamination factors (Cif), potential ecological risk indices (Eir), and the total risk index (RI).

**Results.** The study involved soil sampling from four locations: the botanical reserves "Tsykalove," "Mokhnachanskyi," "Skrypavskyi," and the area near the Zmiivska TPP. The concentrations of heavy metals in soils from the protected areas (reserves "Tsykalove," "Mokhnachanskyi," and "Skrypavskyi") did not exceed permissible levels, except for elevated zinc and iron content. In the soils near the Zmiivska TPP, significant exceedances of background levels were observed: iron, copper, cobalt and zinc. The total risk indices ( $RI < 4$ ) for protected areas indicated low ecological risk: "Tsykalove", "Mokhnachanskyi", and "Skrypavskyi". However, the Zmiivska TPP area ( $RI = 25,98$ ) demonstrated a much higher risk. The highest potential risk indices (Eir) were associated with cobalt and cadmium.

**Conclusions.** Soil contamination by heavy metals in the Zmiivska community is localized, with the most hazardous concentrations observed near the Zmiivska TPP. The protected areas exhibit minor contamination risks, although high bioavailability of zinc and other metals indicates the need for continuous monitoring. The Hakanson methodology proved effective in evaluating health risks associated with heavy metal exposure. These findings highlight the necessity of mitigation measures, including emissions control, soil remediation, and reduced anthropogenic pressure.

**KEYWORDS:** *heavy metals, ecological risk, soil, method of Hakanson, botanical reserve, Zmiivska TPP*

### References

1. Yatsuk, I., Dehtiarov, V., Tykhonenko, D., & Horin, M. (2016). Monitoring of natural soil and agricultural ecosystems as a scientific basis for soil diversity conservation. *Journal of Agroecology*, (4), 57-66. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.4.2016.271211>
2. Gholizadeh, A., Saberioon, M., Ben-Dor, E., & Borůvka, L. (2018). Monitoring of selected soil contaminants using proximal and remote sensing techniques: Background, state-of-the-art and future perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(3), 243–278. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1447717>
3. Zhukov, O., Kunakh, O., Yorkina, N. & Tutova A. (2023). Response of soil macrofauna to urban park reconstruction. *Soil Ecol. Lett.* 5, 220156 <https://doi.org/10.1007/s42832-022-0156-0>
4. Lv, Z. (2020). Construction of soil environment information management platform based on ArcGIS. *2020 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 546 032039. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/546/3/032039>

5. Tudor, B., & Bucevschi, B. T. (2021). Analysis of the Influence of Pesticides on the Soil in an Agricultural Area. *The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle IX, Metallurgy and Materials Science*, 44, 4 (Dec. 2021), 60-66. <https://doi.org/10.35219/mms.2021.4.11>
6. Li, X., Zhu, W., Qin, Y., & Yin, F. (2019). Research Progress and Prospects of Soil Pollution Assessment and Prediction Models. 2019 *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 304 052042 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/5/052042>
7. Wang, Mingze & Liu, Dianfeng & Jia, Jinglei & Zhang, Xiaoyi. (2015). Global trends in soil monitoring research from 1999–2013: a bibliometric analysis. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*. 65. 483-495. <https://doi.org/10.1080/09064710.2015.1030443>
8. Li X., Zhu W., Qin Y., Yin F. (2019). Research Progress and Prospects of Soil Pollution Assessment and Prediction Models *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 340 (5), art. no. 052042. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/304/5/052042>
9. Keith, A. M., Griffiths, R. I., Henrys, P. A., Hughes, S., Lebron, I., Maskell, L. C., Smart, S. M. (2015). Monitoring soil natural capital and ecosystem services by using large-scale survey data. In M. Stromberger, N. Comerford, & D. Lindbo (Eds.), *Soil ecosystems services*. Madison, WI: Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2136/2015.soilecosystemsservices.2014.0070>
10. Zhang, Z. (2023). Analysis of Soil Pollution Status in Different Land Use Types. *Frontiers in Sustainable Development*. 3, 7 (Jul. 2023), 105–109. <https://doi.org/10.54691/fsd.v3i7.5338>
11. Gholizadeh, A., Saberioon, M., Ben-Dor, E., & Borůvka, L. (2018). Monitoring of selected soil contaminants using proximal and remote sensing techniques: Background, state-of-the-art and future perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(3), 243–278. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1447717>
12. Jing Wang, Xianfeng Cheng, Qinhui Huang, Xi Ying, (2022). Analysis method of regional soil pollutants based on distributed sensing technology. *Proc. SPIE 12246, 2nd International Conference on Signal Image Processing and Communication (ICSIPC 2022)*, 1224604 (9 October 2022). <https://doi.org/10.1117/12.2643704>
13. Zhou, L.Y., Zuo, W.G., Li, Z.M., Luo, C.S. (2014). Research profiling of soil pollution from 2000 to 2013. *Advanced Materials Research*, 955-959, 3665-3670. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.955-959.3665>
14. Drozd, O., Zhuravel, M., Naidionova, O. Y., Lezhenina, I., & Polchaninova, N. (2018). The determination of local changes in the supporting ecosystem service of soil on the territory of oil and gas production. *Ecology and the Environment*, 18(2), 15–25. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2018-2\(18\)](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2018-2(18))
15. Vashukevich, N., Gusev, A., Varnina, V. A., Chulkov, V., & Fedorov, A. (2022). Agroecological monitoring of soils in the educational and experimental farm of the Ural State Agrarian University. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1043(1), 012020. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1043/1/012020>
16. Ande, O., & Senjobi, B. (2014). Land degradation assessment of agrarian soils in Ebonyin State for sustainable production. *Journal of Ecology and the Natural Environment*, 6(4), 150–158. <https://doi.org/10.5897/JENE10.081>
17. Seaton, F. M., Barrett, G., Burden, A., Creer, S., Fitos, E., Garbutt, A., ... & Robinson, D. A. (2020). Soil health cluster analysis based on national monitoring of soil indicators. *European Journal of Soil Science*, 71(2), 278–295. <https://doi.org/10.1111/ejss.12958>
18. Huang, J., Wang, Y., Liu, Z. R., & Zhang, Y. (2014). Evaluation on potential ecological risk of heavy metals in soil of Yanjiao. *Advanced Materials Research*, 1044-1045, 314–318. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCI-ENTIFIC.NET/AMR.1044-1045.314>
19. Neagu, A., Soceanu, A., & Birghila, S. (2020). Analysis of soils parameters in correlation with vegetation period. *Revista de Chimie*, 71(9), 326–331. <https://doi.org/10.37358/rc.20.9.8331>
20. Purnama, T. J., Wijayanto, N., & Wasis, B. (2022). Assessing soil properties in various agroforestry lands in Kuningan District, West Java, Indonesia using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). *Biodiversitas*, 23(6), 3112–3120. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d230628>
21. Bono, J. A., Macedo, M., & Tormena, C. A. (2013). Qualidade física do solo em um latossolo vermelho da região sudoeste dos cerrados sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37(3), 591–599. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300021>
22. Sinore, T., Chernet, M., Detamo, K., & Yohannes, M. (2022). Effect of soil management practices on soil physico-chemical properties: A case of Wera Sub-Watershed, Southern Ethiopia. *Advances in Agriculture*, 2022, Article ID 5370477. <https://doi.org/10.1155/2022/5370477>
23. Krainiukov, O., Homenko, A., & Krainiukov, A. (2020). Environmental-toxicological assessment of soil quality in the limits of effect of oil treatment enterprise. *Young Scientist*. № 1. C. 113–119. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-1-77-25>

24. Krainiukov, O., Kryvytska, I., & Naidonova, O. (2023). Environmental and toxicological assessment of the quality of soils under the influence of smiivska TPP. *Young Scientist*, 12 (124), 12-16. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2023-12-124-22>.
25. Krainiukov, O., Miroshnychenko, I., Siabruk O., & Hladkikh, Y. (2022). Effect of oil contamination on the course of changes in chernozem properties and phytotoxicity. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, Series "Geology. Geography. Ecology"*, (57), 296-306. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2022-57-22>
26. Krainiukov, O., & Kryvytska, I. (2023). Principles and methods of diagnostic and monitoring of heavy metals in the soil of urbanized areas. *International Scientific Journal "Internauka"*. № 12 (146). С. 9–12. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2023-12>
27. Bezsonnyi, V. L., Nekos, A. N., Ogorodnyk, A. M. (2024). Heavy metals in the soils of megacities. Environmental protection: *collection of scientific articles of the 20th All-Ukrainian Scientific Taliiv Readings*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, P.85-87. Retrieved from <https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2024/12/taliiv-2024.pdf> (in Ukrainian)
28. Gololobova, O.O., & Maksimova, G.A. (2012). Assessment of technogenic load on the natural environment using complex pollution indicators. Environmental protection. *Collection of scientific papers of the 8th All-Ukrainian scientific Taliiv readings*. Kharkiv. Kharkiv: V. N. Karazin KhNU.. P. 27–32. Retrieved from <https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2019/11/taliiv-2012.pdf> (In Ukrainian)
29. Hololobova, O. O., & Pasko, M. A. (2015). Ecological state of soils in nature conservation landscapes of Zmiiv district, Kharkiv region (on the example of forest reserves "Mokhnachansky", "Skripaivsky" and botanical reserve "Tsykalovo"). *Environmental protection: collection of scientific articles of the XI All-Ukrainian scientific Taliiv readings*. Kharkiv: V. N. Karazin National University,. pp. 149–153. Retrieved from <https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2019/11/taliiv-2015.pdf> (In Ukrainian)
30. Hakanson, L. (1980). An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
31. Long, Z., Huang, Y., Zhang, W., Shi, Z., Yu, D., Chen, Y., Liu, C., & Wang, R. (2021). Effect of different industrial activities on soil heavy metal pollution, ecological risk, and health risk. *Environmental Monitoring and Assessment*. 193(1), 20. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08807-z>
32. Mohammadi, A. A., Zarei, A., Esmaeilzadeh M., Taghavi M., Yousefi M., Yousefi, Z., Sedighi, F., & Javan, S. (2020). Assessment of Heavy Metal Pollution and Human Health Risks Assessment in Soils Around an Industrial Zone in Neyshabur Iran. *Biological Trace Element Research*. 195(1), 343–352. <https://doi.org/10.1007/s12011-019-01816-1>
33. Kysil, V. I. The impact of pollution on the state of land resources. *Land resources of Ukraine*. Kyiv: Agrarian science, 1998. P. 36-65. (In Ukrainian)
34. Miroshnychenko, M. M. (2005). Soil stability as a basis for pedoecological regulation of pollution: author's abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Science in Biology: special 03.00.18 "Soil science" M. Miroshnychenko. Kharkiv,. 38p. (In Ukrainian)
35. Fateyev, A.I., Miroshnychenko, M.M., Pashchenko, Ya. V, Samokhvalova, V. L. (2006). Restoration of fertility of technogenic soil pollution: History and modernity of soil science and agrochemistry in Ukraine.; edited by B. S. Noska. Kharkiv.. P. 176-183. (In Ukrainian)
36. Hygienic regulations for the permissible content of chemical substances in soil, approved by the Order of the Ministry of Health of Ukraine dated July 14, 2020 No. 1595, Registered with the Ministry of Justice of Ukraine on July 31, 2020 under No. 722/35005. Official Gazette of Ukraine dated August 18, 2020 — 2020, No. 64, p. 107, article 2084, act code 100354/2020. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text> (In Ukrainian)
37. Nekos, A. N., Bezsonny, V. L., Zakharova M. A., & Soldatenko M. A. (2024). Assessment of environmental risk caused by soil pollution. Ecology, environmental protection and balanced nature management: education – science – production – 2024: collection of materials. XXVI International Scientific and Practical Conference (Kharkiv, April 17-18, 2024). Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University, 2024. pp. 96–98. Retrieved from [https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2024/05/tezi-xxvi\\_mezhd-konf-2024.pdf](https://ecology.karazin.ua/wp-content/uploads/2024/05/tezi-xxvi_mezhd-konf-2024.pdf) (In Ukrainian)

The article was received by the editors 10.10.2024

The article is recommended for printing 22.11.2024