



УДК 504.05:504.53:550.4:581.5
DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.12.2025.30>

ВПЛИВ ТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ НА ҐРУНТИ САНІТАРНО-ЗАХИСНИХ ЗОН ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ МІСТА ЖИТОМИРА

О. М. Василенко¹, І. П. Онищук²

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю оцінювання впливу техногенного забруднення на ґрунти санітарно-захисних зон (СЗЗ) промислових підприємств, що є важливим для гарантування екологічної безпеки урбанізованих територій. Особливо актуальним це питання є для територій, де перекриваються санітарно-захисні зони кількох промислових об'єктів, що може посилювати негативні екологічні наслідки.

Метою дослідження є визначення фізико-хімічних властивостей ґрунтів, умісту важких металів (Pb, Cd, Cu, Zn, Co, Ni) і рівня радіаційного фону в межах санітарно-захисних зон підприємства з виробництва полімерних волокон у місті Житомирі.

Методи дослідження включали відбір проб ґрунту в межах санітарно-захисної зони, лабораторне визначення кислотності ґрунтів (активної, обмінної, гідролітичної), аналіз концентрацій важких металів методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії, а також вимірювання радіаційного фону (γ- та β-випромінювання). Проведено геоботанічний аналіз рослинного покриву з використанням програмного забезпечення "Turboveg" для оцінювання ступеня синантропізації та трансформації рослинних угруповань під впливом техногенного навантаження.

Результати засвідчили, що кислотність ґрунтів перебуває в межах нейтрального та слабколужного середовища. Виявлено перевищення гранично допустимих концентрацій важких металів (Pb, Cd, Cu, Co), що свідчить про суттєве техногенне навантаження. Радіаційний фон не перевищує норму. Геоботанічний аналіз виявив значне поширення синантропних та інвазивних видів рослин, зокрема *Solidago canadensis* L.

У роботі встановлено просторові особливості розподілу важких металів і їхня залежність від кислотності ґрунтів на території перекриття санітарно-захисних зон підприємств.

Практична значущість дослідження полягає у використанні отриманих результатів для еколо-

¹ кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Vasylenko-O@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3283-6980

² кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри екології та географії
(Житомирський державний університет імені Івана Франка, м. Житомир)
e-mail: Onyshchuk-I@zu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2847-8570

гічного моніторингу промислових територій, оцінювання рівня забруднення та розроблення рекомендацій щодо управління техногенним навантаженням на міські екосистеми.

Ключові слова: важкі метали, радіаційний фон, санітарно-захисна зона, техногенний вплив, екологічний моніторинг, промислове забруднення, геоботанічний аналіз.

THE IMPACT OF TECHNOGENIC POLLUTION ON SOILS OF SANITARY PROTECTION ZONES OF INDUSTRIAL ENTERPRISES IN ZHYTOMYR

O. M. Vasylenko, I. P. Onyshchuk

The relevance of the study is due to the need to assess the impact of technogenic pollution on soils of sanitary protection zones (SPP) of industrial enterprises, which is important for ensuring the ecological safety of urbanized areas. This issue is especially relevant for areas where the SPPs of several industrial facilities overlap, which can exacerbate negative environmental consequences.

The purpose of the study is to determine the physicochemical properties of soils, the content of heavy metals (Pb, Cd, Cu, Zn, Co, Ni) and the level of background radiation within the SPP of a polymer fiber production enterprise in the city of Zhytomyr.

The research methods included soil sampling within the sanitary protection zone, laboratory determination of soil acidity (active, exchangeable, hydrolytic), analysis of heavy metal concentrations by atomic absorption spectrophotometry, and measurement of background radiation (γ - and β -radiation).

A geobotanical analysis of vegetation cover was carried out using the Turboveg software to assess the degree of synanthropization and transformation of plant communities under the influence of technogenic load.

The results showed that the acidity of the soils is within the neutral and weakly alkaline environment. Exceedance of the maximum permissible concentrations of heavy metals (Pb, Cd, Cu, Co) was detected, which indicates a significant technogenic load. The radiation background does not exceed the norm.

*Geobotanical analysis revealed a significant spread of synanthropic and invasive plant species, in particular *Solidago canadensis* L.*

The scientific novelty of the work lies in establishing the spatial features of the distribution of heavy metals and their dependence on soil acidity in the overlap zone of the enterprises' SPZ.

The practical significance of the study lies in using the obtained results for environmental monitoring of industrial areas, assessing the level of pollution and developing recommendations for managing technogenic load on urban ecosystems.

Key words: heavy metals, radiation background, sanitary protection zone, technogenic impact, environmental monitoring, industrial pollution, geobotanical analysis.

Вступ

Сучасні промислові зони характеризуються інтенсивним техногенним навантаженням, що призводить до значних екологічних ризиків, зокрема забруднення ґрунтів важкими металами, органічними сполуками й іншими токсичними речовинами. Особливої уваги потребують території, де перекриваються санітарно-захисні зони (далі – СЗЗ) кількох підприємств, оскільки їхні викиди можуть взаємодіяти, змінюючи мобільність і біодоступність забруднювальних речовин.

У місті Житомирі, на вул. Промисловій, розташована значна кількість виробничих підприємств, зокрема ті, що спеціалізуються на металообробці, виробництві гнучкої упаковки, переробці полімерів і випуску шкіряних виробів. Викиди цих підприємств можуть змінювати фізико-хімічні властивості ґрунту, спричиняти накопичення

токсичних компонентів і трансформацію рослинного покриву. Зокрема, шкіряне виробництво є джерелом хромових сполук, які можуть потрапляти в повітря, ґрунти та водні ресурси, створюючи екологічні загрози. Водночас металообробка сприяє осадженню аерозолів, що містять частинки важких металів.

Забруднення ґрунтів у промислових районах не лише впливає на їхню екологічну функцію, а й може спричиняти деградацію земель, проникнення токсичних речовин у водоносні горизонти, що несе загрозу для здоров'я населення. Особливої актуальності ця проблема набуває через відсутність системного моніторингу стану ґрунтів у межах СЗЗ, що ускладнює оцінювання реального рівня забруднення та впровадження ефективних заходів із його мінімізації.

Актуальність дослідження полягає в необхідності комплексного аналізу

впливу промислових підприємств на стан ґрунтів у межах санітарно-захисних зон. Дослідження спрямоване на визначення рівня забруднення важкими металами, аналіз впливу забруднення на рослинний покрив у межах СЗЗ підприємства з виробництва гнучкої упаковки, що розташоване на території перекриття санітарно-захисних зон. Отримані результати можуть стати основою для розроблення екологічних стратегій зменшення техногенного навантаження та впровадження сучасних технологій очищення і відновлення ґрунтів.

Техногенне забруднення ґрунтів, особливо у промислових зонах, залишається однією із ключових екологічних проблем сучасності. Основна увага наукових досліджень спрямована на ідентифікацію забруднювачів, моделювання їх поширення, аналіз впливу на екосистеми та розроблення ефективних заходів для управління екологічними ризиками. Зокрема, у праці Т.Г. Іващенко й І.Д. Пушкарьової акцентовано увагу на виявленні небезпечних речовин, як-от свинець, кадмій і мідь, у ґрунтах територій промислових підприємств. Автори наголошують, що ці елементи становлять серйозну екологічну загрозу, а оцінювання їх розподілу необхідне для управління техногенним навантаженням (Іващенко і Пушкарьова, 2014). У дослідженні Г.А. Кроїка розглядаються токсикологічні наслідки накопичення важких металів у ґрунтах промислових агломерацій, підкреслено їхню здатність до міграції через трофічні ланцюги, що створює додаткові ризики для здоров'я людини та функціонування екосистем (Кроїк, 2011).

Сучасні програмні рішення відіграють важливу роль у вивченні екологічного стану ґрунтів. Наприклад, програма "Turboveg for Windows", описана в роботі S.M. Hennekens, дозволяє аналізувати геоботанічні дані та впорядковувати інформацію про рослинний покрив (Hennekens, 2009). У дослідженні І.В. Хом'яка та його колег підкреслено значення класифікації рослинності для моделювання поширення забруднень, оскільки синтаксономічні аналізи допомагають краще зрозуміти ризики, пов'язані з техногенними впливами, і оцінити ступінь синантропізації екосистем (Хом'як, 2022; Хом'як і Хом'як, 2024).

У контексті міжнародних досліджень у публікації "Soil pollution and health" (European ..., 2021) звернено увагу на небезпеку промислових відходів, які є джерелом важких металів і органічних забруд-

нювачів, здатних накопичуватися у ґрунтах. Автори наголошують на інтеграції моніторингу ґрунтів з екологічною політикою, спрямованою на зниження забруднення. У роботі "The chemical nature and properties of soil contaminants" (Food ..., 2021) описано природу основних забруднювачів, механізми їх взаємодії із ґрунтом і вплив на його властивості. Окремо акцентовано на втраті родючості земель і необхідності впровадження технологій ремедіації. У статті "Soil pollution indices and health risk assessment of metal (loid)s in industrial areas" (Mohiuddin et al., 2024) проаналізовано рівні забруднення ґрунтів металами у промислових районах. Автори виявили, що концентрація кадмію, свинцю та миш'яку в таких районах значно перевищує допустимі норми, що створює високі ризики для здоров'я людей.

Отже, сучасні дослідження підтверджують необхідність комплексного підходу до моніторингу техногенного забруднення ґрунтів. Це передбачає ідентифікацію джерел забруднення, аналіз рослинного покриву, впровадження сучасних методів моделювання екологічної небезпеки, а також розроблення стратегій сталого використання ґрунтових ресурсів.

Вирішення проблеми забруднення ґрунтів у зонах впливу хімічної промисловості ускладнюється низкою невирішених питань. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах відсутності системного моніторингу, оскільки в Україні відсутня систематична програма моніторингу стану ґрунтів у зонах впливу конкретних хімічних підприємств. Така ситуація призводить до значних прогалин у даних, які необхідні для оцінювання реального стану довкілля, прогнозування екологічних ризиків і впровадження своєчасних заходів із запобігання подальшій деградації ґрунтів. Наявні дослідження є фрагментарними та часто обмежуються окремими регіонами, що ускладнює формування цілісної картини.

Ще однією важливою проблемою є відсутність актуальних локальних даних про специфічні забруднювачі ґрунтів, які генерує промисловість. Брак такої інформації значно ускладнює розроблення ефективних заходів із контролю забруднення та реабілітації ґрунтів у зонах техногенного впливу.

Водночас наявний міжнародний досвід у сфері оцінювання та відновлення ґрунтів не завжди може бути ефективно адаптований до українських реалій. Більшість

запропонованих підходів розроблені для стабільних регіонів і не враховують специфіки забруднення та техногенного навантаження в умовах воєнних дій чи нестабільної інфраструктури.

Нарешті, відсутність інтегрованого підходу до екологічного управління ґрунтами на державному рівні залишається суттєвою проблемою. Чинна політика не враховує всіх аспектів впливу промислових підприємств на ґрунти та не передбачає ефективних інструментів для моніторингу, аналізу та впровадження заходів із реабілітації. Це створює додаткові перешкоди для сталого управління ґрунтовими ресурсами.

Метою дослідження було встановлення впливу діяльності підприємства з виробництва полімерних матеріалів на стан ґрунтів у межах санітарно-захисної зони. Дослідження передбачало визначення рівня кислотності та концентрацій важких металів у ґрунтового покриві, а також оцінювання змін у рослинному угрупованні під впливом хімічного навантаження.

Матеріал і методи

У процесі дослідження було здійснено відбір об'єднаних змішаних проб ґрунту в межах санітарно-захисної зони підприємства з виробництва полімерних матеріалів. Відбір проб проводився відповідно до стандартних методик, з урахуванням просторової варіабельності забруднення. Проби відбиралися у випадково визначених точках на різній відстані від основних виробничих територій підприємств, що дозволило забезпечити репрезентативність даних. Ґрунтові зразки відбиралися з поверхневого шару та із глибини 20 см на п'яти майданчиках: П1 – на відстані 50 м, П2 – 75 м, П3 – 100 м, П4 – 125 м, П5 – 150 м.

Для визначення кислотності ґрунтів проводили три види аналізів: оцінювали активну, обмінну та гідролітичну кислотність. Активну кислотність оцінювали шляхом підготовки водної витяжки: наважку повітряно-сухого ґрунту масою 6,00 г заливали 30 мл дистильованої води, перемішували в шейкері протягом 20 хвилин, після чого відбирали порцію розчину над осадом і вимірювали рН за допомогою рН-метра зі скляним електродом (І-117) (Набиванець та ін., 1996).

Обмінну кислотність визначали методом сольової витяжки за допомогою 1 М розчину KCl. Наважку ґрунту масою 20,00 г заливали 50 мл 1 М розчину KCl, перемішували протягом 15 хвилин, після чого вимірювали

рН у витяжці за допомогою рН-метра (І-117) (Набиванець та ін., 1996).

Гідролітичну кислотність визначали на основі сольової витяжки, яку готували відповідно до методики (Набиванець та ін., 1996). Для цього наважку повітряно-сухої проби ґрунту масою 40,00 г заливали 100 мл 1 М розчину ацетату натрію, перемішували в шейкері протягом 30 хвилин, після чого отриманий розчин пропускали через паперовий фільтр. П'ятдесят мілілітрів прозорого фільтрату титрували 0,1 М розчином NaOH у присутності фенолфталеїну до появи блідо-рожевого забарвлення. Гідролітичну кислотність ґрунту ($H_{\text{гидр}}$) розраховували за формулою:

$$H_{\text{(гидр)}} = \frac{C(\text{NaOH}) \cdot V(\text{NaOH})}{V(\text{сольової витяжки})} \times 1,75,$$

де $V_{(\text{NaOH})}$ – об'єм розчину, який витратили на титрування 50 мл ґрунтової витяжки; $C_{(\text{NaOH})}$ – концентрація розчину для титрування; 1,75 – коефіцієнт перерахунку повної гідролітичної кислотності на 1 кг ґрунту (Набиванець та ін., 1996).

Для проведення аналізу вмісту важких металів (Pb^{2+} , Cu^{2+} , Cd^{2+} , Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}) у ґрунтових пробах використовували метод кислотної витяжки. Наважку сухого ґрунту масою 5 г заливали 25 мл 1 М розчину HNO_3 та перемішували протягом 30 хвилин. Отриманий розчин фільтрували через паперовий фільтр 2–3 рази. Уміст катіонів у витяжці (мг/л) визначали методом атомно-абсорбційної спектрофотометрії з використанням полум'яного атомно-абсорбційного спектрофотометра С115-М (Selmi, Україна).

Атомізацію здійснювали полум'яним способом із використанням суміші ацетилен – повітря. Вимірювання проводили на відповідних довжинах хвиль для кожного елемента: Pb – 283,3 нм, Cd – 228,8 нм, Cu – 324,7 нм, Ni – 232,1 нм, Zn – 213,9 нм. Ширина щілини спектрофотометра становила 0,5 см. Концентрацію в розчині визначали методом калібрувального графіка.

Для оцінювання радіоактивного забруднення ґрунтів було використано радіометр МКС-05 «Терра». Радіометр дозволяв визначати еквівалентну дозу та потужність еквівалентної дози γ -випромінювання в мкЗв/год, а також поверхневу щільність потоку β -частинок (Гудков та ін., 2019).

Рослинні угруповання на досліджуваній території оцінювали за допомогою геоботанічного опису й аналізу рослинного складу.

Обробку отриманих даних здійснювали із використанням програми “Turboveg for Windows” (Hennekens, 2009). Визначення біотопів і класифікація рослинності проводилися відповідно до Національного каталогу біотопів України (Національний ..., 2018).

Застосовані методики дозволили забезпечити комплексний підхід до оцінювання стану ґрунтів у санітарно-захисній зоні підприємств із виробництва полімерних матеріалів. Поєднання хімічних, фізико-хімічних і геоботанічних методів дослідження дозволило отримати репрезентативні результати, необхідні для проведення аналізу впливу техногенного навантаження на екосистеми промислових зон.

Результати

У результаті проведених досліджень було встановлено, що кислотність ґрунтового покриву в межах санітарно-захисної зони підприємства з виробництва полімерних матеріалів варіює залежно від просторового розташування пробовідбірних майданчиків. Дані щодо активної, обмінної та гідролітичної кислотності ґрунтів наведені в таблиці 1.

Активна кислотність ($pH\ H_2O$), яка визначає концентрацію водневих іонів у ґрунтовому розчині, перебувала в діапазоні 6,62–7,16. Це свідчить про нейтральний або слабколужний характер ґрунтового середовища в дослідженій зоні. Найменше значення pH було зафіксовано на майданчику П4 (125 м) – 6,62, що свідчить про слабку кислотність ґрунту в цій ділянці. Максимальний рівень активної кислотності спостерігався на майданчику П3 (100 м) – 7,16, що може бути пов'язано з особливостями складу ґрунтового покриву або локальними чинниками впливу промислових викидів.

Показники обмінної кислотності ($pH\ KCl$) були в межах 6,68–7,26, що свідчить про досить стабільний стан ґрунтового буферного комплексу. Вищі значення pH обмінної кислотності зафіксовано на майданчику П3 (7,26), що свідчить про здатність ґрунту

до нейтралізації кислотних компонентів. Найменше значення обмінної кислотності спостерігалось на ділянці П4 (6,68), що може свідчити про більший уміст рухомих кислотних форм або потенційну мобільність важких металів у цій зоні.

Гідролітична кислотність ґрунтів, яка характеризує їхню здатність до сорбційного накопичення іонів водню, коливалася в межах 0,00083–0,0083 ммоль H^+ /кг. Найвищий рівень гідролітичної кислотності був зафіксований у пробах з майданчика П3 (100 м) – 0,0083 ммоль H^+ /кг, що може бути свідченням деградації ґрунту або підвищеного рівня його виснаження. Найнижчий рівень гідролітичної кислотності встановлено для майданчика П2 (75 м) – 0,00083 ммоль H^+ /кг, що може вказувати на кращі умови для збереження ґрунтової структури.

Отримані результати свідчать про те, що ґрунти в межах санітарно-захисної зони підприємства з виробництва полімерних матеріалів не мають значних відхилень у кислотності, що могло б свідчити про надмірне антропогенне навантаження. Усі досліджені параметри – у межах оптимальних значень для більшості природних ґрунтів із нейтральним і слабколужним середовищем.

Отримані результати вмісту іонів важких металів дозволяють оцінити ступінь забруднення ґрунтового покриву та визначити просторові закономірності накопичення важких металів залежно від відстані від потенційного джерела викидів. У таблиці 2 наведено концентрації досліджуваних металів у відібраних пробах.

Для оцінювання рівня забруднення отримані результати порівнювалися з нормативами гранично допустимих концентрацій (далі – ГДК), затвердженими постановою Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. № 1325 «Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин» (Про затвердження ..., 2021).

Таблиця 1

Показники активної і потенційної кислотності ґрунтових проб досліджуваної території

№ проби	Активна кислотність	Обмінна кислотність	Гідролітична кислотність
П1	6,97	7,05	0,0012
П2	6,83	6,94	0,00083
П3	7,16	7,26	0,0083
П4	6,62	6,68	0,0012
П5	7,05	6,88	0,00097

Таблиця 2

Вміст іонів важких металів у досліджуваних пробах

Вміст іонів важких металів (мг/кг)	ГДК мг/кг	П1	П2	П3	П4	П5
Cd *, **	1,5	0,615	2,9	0,245	0,285	0,485
Pb*, ***, ****	6	9,85	6,45	10,1	24,8	6,1
Cu	3	5,55	5,25	6,65	9,25	3,4
Zn*	150	10,0214	9,47485	12,3538	16,9156	8,12015
Co	50	66,04495	60,04085	70,06895	32,8947	51,4627
Ni *, **	40	7,75	21,7	7,1	4,3	5,7

Примітка: Характеристика шкідливих хімічних речовин за характером дії на організм людини: * – канцерогенні (бластомогенні) сполуки: плумбум (Pb), цинк (Zn), нікель (Ni); ** – сенсibiliзуючі хімічні речовини або алергени (нікель (Ni)); *** – мутагенні речовини (плумбум (Pb)); **** – проявляє репродуктивну токсичність (плумбум (Pb)).

Концентрація кадмію в досліджених пробах змінювалася в межах 0,245–2,9 мг/кг, причому у пробі П2 зафіксовано перевищення ГДК (1,5 мг/кг) в 1,93 раза.

Вміст свинцю коливався від 6,1 мг/кг (П5) до 24,8 мг/кг (П4). Значне перевищення нормативного рівня (6 мг/кг) встановлено у пробах П1 (1,64 раза), П2 (1,08 раза), П3 (1,68 раза) та П4 (4,13 раза).

Концентрація міді (Cu) у ґрунті варіювала від 3,4 мг/кг (П5) до 9,25 мг/кг (П4), що у пробах П1, П2, П3 та П4 перевищувало допустимий рівень (3 мг/кг) відповідно в 1,85, 1,75, 2,22 та 3,08 раза.

Вміст цинку (Zn) змінювався в межах 8,12–16,91 мг/кг, що не перевищує встановленого нормативу (150 мг/кг).

Кобальт (Co) у пробах ґрунту містився в кількості 32,89–70,06 мг/кг. У зразках П1 (1,32 раза), П2 (1,2 раза) та П3 (1,4 раза) його концентрація перевищувала ГДК (50 мг/кг).

Концентрація нікелю (Ni) була в межах 4,3–21,7 мг/кг, що не перевищує нормативних значень (40 мг/кг).

Отримані результати свідчать про перевищення допустимих рівнів Cd, Pb, Cu та Co

в окремих пробах, що вказує на наявність забруднення важкими металами в досліджуваній зоні.

Дослідження рівня радіоактивного забруднення ґрунтового покриву в межах санітарно-захисної зони підприємства охоплювало вимірювання потужності γ -випромінювання та поверхневої щільності β -частинок. Необхідність проведення цього аналізу була зумовлена виявленням високих концентрацій активної форми іонів Co^{2+} у змішаних пробах, що могло свідчити про потенційну наявність радіоактивних ізотопів кобальту у ґрунтового середовищі.

Отримані результати свідчать, що потужність γ -випромінювання в досліджених пробах змінювалася в межах 0,15–0,3 мкЗв/год, що не перевищує встановленого нормативного рівня 0,3 мкЗв/год для екологічної безпеки (табл. 3). Максимальне значення зафіксовано у пробі П1 (0,3 мкЗв/год), що відповідає гранично допустимому рівню, тоді як найнижчі показники спостерігалися у пробах П3 (0,16 мкЗв/год) та П5 (0,15 мкЗв/год), що свідчить про їхню радіаційну безпеку.

Таблиця 3

Результати радіологічного дослідження проб

Середні значення	П1	П2	П3	П4	П5	Норма мкЗв/год
Потужність γ	0,3	0,26	0,16	0,24	0,15	0,3*
Поверхнева щільність потоку β -частинок част./ $(cm^2 \times xв)$.	0,04	0,06	0,03	0	0	0,67**

Примітка. * – допустима потужність γ випромінювання на годину для населення становить 0,3 мкЗв/год (це значення базується на загальнорічній дозі 0,1 мЗв (100 мкЗв) і передбачає, що людина буде піддаватися впливу цієї дози протягом усього року; ** – допустима норма поверхневої щільності β -потоку для населення становить $0,04 \cdot 10^3$ частинок на cm^2 на годину** (у перерахунку на хвилини: $0,04 / 60 = 0,67$ част./ $(cm^2 \times хв)$).

Аналіз поверхневої щільності потоку β -частинок засвідчив незначні значення, що були в межах 0–0,06 част./см²·хв. У пробах П4 та П5 активність β -випромінювання не виявлено (0 част./см²·хв), а максимальне значення (0,06 част./см²·хв) зафіксовано у пробі П2. Це свідчить про відсутність суттєвого накопичення β -випромінюючих радіонуклідів у ґрунтах досліджуваної території.

Отримані результати підтверджують, що рівень радіоактивного забруднення ґрунтового покриву в межах санітарно-захисної зони не перевищує нормативних значень і не становить екологічної загрози. Виявлені в попередніх хімічних аналізах підвищені концентрації іонів Co^{2+} не корелюють із радіологічними показниками, що свідчить про відсутність значної присутності радіоактивних ізотопів кобальту у ґрунтах досліджуваної території.

Було встановлено, що рослинність досліджуваної території належить до 5 класів, 7 порядків, 8 союзів, 11 асоціацій, за класифікацією Ж. Браун-Бланке. Синтаксономічна схема рослинних угруповань така:

Molinio-Arrhenatheretea R.Tx 1937: *Galietaia veri* Mirk. et Naum. 1986: *Agrostion vinealis* Sipaylova, Mirk., Shelyag et V.Sl. 1985: *Agrostio vinealis-Calamagrostietum epigei* Shelyag-Sosonko et al. ex Shelyag-Sosonko et al. 1985, *Agrostietum vinealis-tenuis* Shelyag et al. 1985, *Poëtum angustifoliae* Shelyag-Sosonko et al. 1986, *Achillea submiefolium-Dactyletum glomeratae* Smetana, Derpoluk, Krasova 1997; *Arrhenatheretalia elatioris* Tüxen 1931: *Cynosurion cristati* Tx. 1947: *Lolietum perennis* Gams 1927.

Rhamno-Prunetea Rivas Goday et Borja Carbonell ex Tüxen 1962: *Prunetalia spinosae* R.Tx 1952: *Prunion spinosae* Soó (1931) 1940: *Swido sanguinei-Crataegetum leiomonogynae* Fitsailo 2005.

Artemisietea vulgaris Lohmeyer et al. ex von Rochow 1951: *Agropyretalia intermedio-repentis* T. Müller et Görs 1969: *Convolvulo arvensis-Agropyron repentis* Görs 1967: *Agropyretum repentis* Felföldy 1942; *Onopordetalia acanthii* Br.-Bl. et Tx. ex Klika et Hadač 1944: *AOnopordion acanthii* Br.-Bl et al. 1926: *Potentillo argenteae-Artemisietum absinthii* Faliński 1965, *Tanaceto-Artemisietum vulgaris* Br.-Bl (1931) 1949.

Polygono-Poëtea annuae Rivas-Martinez 1975: *Polygono arenastri-Poëitalia annuae* Tx. in Géhu et al. 1972 corr. Rivas Martinez et al. 1991: *Polygono-Coronopodion* Sissingh 1969: *Polygonetum arenastri* Gams 1927

corr. Lániková in Chytrý 2009, *Saginion procumbentis* Tx. et Ohba in Géhu et al. 1972: *Poetum annuae* Gams 1927.

Plantaginetea majoris Tx. et Preising ex von Rochow 1951: *Potentillo-Polygonetalia avicularis* R. Tx. 1947: *Plantagini-Prunellion* Eliáš 1980: *Potentilletum reptantis* Eliáš 1974.

Обговорення

Отримані результати дослідження свідчать про складні закономірності розподілу важких металів у межах санітарно-захисної зони підприємства з виробництво полімерних волокон. Виявлені просторові варіації концентрацій забруднювальних речовин можуть бути зумовлені техногенним впливом, а саме, діяльністю промислових підприємств, що функціонують у цій зоні. Особливу роль у рівні забруднення відіграє перекриття санітарно-захисних зон (СЗЗ) різних виробництв, які можуть мати різний хімічний склад викидів, що ускладнює встановлення домінантного джерела забруднення. Беручи до уваги наявність у цій зоні підприємств, пов'язаних із металообробкою, виготовленням ізоляційних матеріалів, переробкою полімерів і виготовленням шкіряних виробів, хімічний склад ґрунтів формується під впливом множинних антропогенних чинників.

Перекриття СЗЗ різних підприємств може сприяти кумуляції забруднення, посилювати його негативний вплив на довкілля. За таких умов викиди різних виробництв можуть взаємодіяти, утворювати додаткові токсичні сполуки або ж змінювати хімічну рухливість окремих елементів у ґрунтового середовищі. Найвищі концентрації свинцю, міді та цинку, зафіксовані у пробі П4, можуть бути результатом осадження аерозольних частинок з атмосферних викидів підприємств, що здійснюють металообробку та фарбування матеріалів. Підвищені рівні кадмію та нікелю у пробі П2 можуть бути пов'язані з діяльністю підприємств з обробки металів із використанням кадмієвих сплавів. Висока мобільність цих металів порівняно з іншими елементами зумовлює їхню здатність до переміщення у ґрунтових горизонтах, що може пояснювати їхню локалізовану присутність у зонах дослідження.

Зниження рівня рН ґрунту сприяє підвищенню концентрації Pb, Cu та Zn (див. табл. 2), що узгоджується із загальновідомими закономірностями їхньої розчинності в кислому середовищі (див. табл. 1). Це особливо виражено в зоні з найнижчими показниками кислотності (проба П4), де зафіксовані

максимальні концентрації важких металів, що підвищує їхню біодоступність і мобільність. Водночас висока гідролітична кислотність (див. табл. 1, проба ПЗ) сприяє зменшенню рухливості металів, що пояснює нижчі рівні забруднення на цій ділянці.

Результати радіологічного аналізу (див. табл. 3) не виявили значних відхилень у рівні γ -випромінювання та щільності потоку β -частинок, що свідчить про відсутність радіоактивного забруднення в межах санітарно-захисної зони підприємств. Це означає, що підвищені концентрації кобальту у пробах не пов'язані з його радіоактивними ізотопами, а є наслідком виробничої діяльності, імовірно, металургійного характеру. Зважаючи на те, що кобальт широко використовується в металообробці та виробництві електронних компонентів, його підвищений уміст може бути наслідком діяльності підприємств з такими виробничими процесами.

Аналіз результатів дослідження свідчить, що розподіл важких металів у межах досліджуваної території є нерівномірним і має просторову специфіку, зумовлену фізико-хімічними властивостями ґрунту (див. табл. 1) та впливом промислових викидів (див. табл. 2). Установлено, що перевищення нормативних значень ГДК для Cd, Pb, Cu та Co в окремих пробах свідчить про наявність забруднення важкими металами, що потребує подальшого моніторингу й оцінювання його довгострокових наслідків. Виявлена залежність між кислотністю ґрунту та накопиченням важких металів підтверджує необхідність комплексного аналізу фізико-хімічних характеристик ґрунту для визначення його здатності до акумуляції та мобілізації токсичних елементів.

Виявлені закономірності підтверджують необхідність комплексного підходу до оцінювання екологічного стану, який охоплює не лише фізико-хімічні характеристики ґрунту, а й біологічні показники, що можуть слугувати додатковими індикаторами техногенного навантаження. Одним із ключових елементів такої оцінки є аналіз рослинного покриву, який відображає довготривалі зміни у структурі екосистеми під впливом забруднення. Геоботанічне дослідження території дозволяє виявити, яким чином фітогенно-ценотичні процеси реагують на зміну хімічного складу ґрунту, оцінити рівень синантропізації флори, а також визначити можливі негативні тенденції у трансформації природних фітоценозів.

Флора усіх рослинних угруповань на дослідженій території, включно із природною, дуже синантропізована. У ній трапляються як аборигенні, так і чужинські антропопотолерантні види (Хом'як і Хом'як, 2024). Дуже великі площі охоплює інвазійний вид – трансформер золотушник канадський (*Solidago canadensis* L.) (Тарарай і Хом'як, 2019; Соловійова і Хом'як, 2021). Рослини цього виду приваблюють комах-запилювачів, зокрема й медоносних бджіл (*Apis mellifera* L.) (Хом'як, 2018). Отже, мідь і свинець можуть потрапити у продукти бджільництва, від них у людський організм (Хом'як і Бурлака, 2005).

Рослинний покрив досліджуваної території істотно порушений і розріджений. Це може спричиняти підняття та перенесення пилу під час сильних поривів вітру чи пересування техніки. Разом із пилом у дихальні шляхи людини і тварин можуть потрапляти присутні в ньому іони важких металів.

Висновки

Отримані результати дослідження засвідчують значний вплив промислової діяльності на екологічний стан ґрунтового покриву в межах санітарно-захисної зони (СЗЗ) підприємств, розташованих на території вул. Промислової в місті Житомирі. Виявлено перевищення гранично допустимих концентрацій важких металів (Cd, Pb, Cu, Co), що свідчить про техногенне забруднення, з нерівномірним просторовим розподілом. Найвищі концентрації свинцю, міді та цинку зафіксовано у пробі П4, що може бути пов'язано з атмосферними викидами підприємств металургійної та хімічної промисловості. Підвищений рівень кадмію та нікелю у пробі П2 свідчить про специфічні джерела забруднення, пов'язані з обробкою металів і використанням полімерних матеріалів.

Аналіз кислотності ґрунтів показав переважно нейтральне або слабколужне середовище, однак зниження рН в окремих пробах сприяє підвищенню мобільності важких металів. Радіологічні показники перебувають у межах нормативних значень, що виключає ймовірність радіоактивного забруднення.

Геоботанічне дослідження виявило високу синантропізацію рослинного покриву, зокрема значне поширення інвазійних видів, як-от *Solidago canadensis* L., що свідчить про трансформацію екосистем під впливом забруднення.

Необхідні подальший моніторинг стану ґрунтів, оцінювання довготривалих тенденцій забруднення та впровадження заходів

із рекультивації. Доцільно використовувати біоіндикаційні методи та геоінформаційні технології для просторового аналізу забруднення, що сприятиме ефективному управлінню промисловими зонами та зменшенню екологічних ризиків.

Список використаної літератури

Гудков І.М., Кашпаров В.О., Паренюк О.Ю. Радіоекологічний моніторинг : навчальний посібник. Київ, 2019. 188 с.

Іващенко Т.Г., Пушкарєва І.Д. Визначення забруднюючих речовин ґрунту територій промислових підприємств та ідентифікація їх екологічної небезпеки. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2014. № 4. С. 102–105.

Кроїк Г.А. Токсикологічні аспекти накопичення та розподілу важких металів у ґрунтах промислових агломерацій. *Біорізноманіття та роль тварин в екосистемах* : матеріали VI Міжнародної наукової конференції. Дніпропетровськ : Вид-во ДНУ, 2011. С. 15–18.

Національний каталог біотопів України / за ред. А.А. Куземко та ін. Київ : ФОП Ю.Я. Клименко, 2018. 442 с.

Про затвердження нормативів гранично допустимих концентрацій небезпечних речовин у ґрунтах, а також переліку таких речовин : постанова Кабінету Міністрів України від 15 грудня 2021 р. № 1325. *Офіційний вісник України*. 2021. № 101 [Електронний ресурс]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1325-2021-p> (дата звернення: 03.03.2025).

Соловійова А., Хом'як І.В. Поведінкові стратегії інвазійних видів рослин. *Сталий розвиток країни в рамках європейської інтеграції* : Усеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених. Житомир : ЖДТУ, 2021. С. 44.

Тарарай А.М., Хом'як І.В. Інвазійна флора фітоценозів класу *Artemisietea vulgaris* Lonm. Rrsa et R. TX. 1950 міста Житомир. *Сталий розвиток країни в рамках європейської інтеграції* : Усеукраїнська науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених. Житомир, 2019. С. 29.

Хом'як І.В., Бурлака В.А. Характеристики екосистем Словечансько-Овруцького кряжу, як об'єктів і кормової бази бджільництва. *Вісник Державного агроєкологічного університету*. 2005. № 2. С. 23–252.

Хом'як І.В. Вплив інвазій видів-трансформерів на динаміку рослинності перелогів Українського Полісся. *Біоресурси і природокористування*. 2018. Т. 10. № 1–2. С. 29–35.

Хом'як І.В. Синтаксономія відновлюваної рослинності кар'єрів Центрального Полісся. *Український ботанічний журнал*. 2022. № 79 (3). С. 142–153. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj79.03.142>.

Хом'як І.В., Хом'як О.І. Потенціал спонтанного тераформінгу ландшафтів суходолу з позицій сучасної теорії динаміки екосистем. *Український журнал природничих наук*. 2024. № 8. С. 289–299. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.30>.

European Environment Agency. Soil pollution and health 2021. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollution/health/soil-pollution> (дата звернення: 26.01.2025).

Food and Agriculture Organization of the United Nations. The chemical nature and properties of soil contaminants health. 2021 [Електронний ресурс]. URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fe5df8d6-6b19-4def-bdc6-62886d824574/content/src/html/chapter-02-2.html> (дата звернення: 26.01.2025).

Hennekens S.M. Turboveg for Windows: A database management system for vegetation data. User's guide. Wageningen : Alterra, 2009.

Mohiuddin K.M., Liu Z., Yang W., Zheng H., Wang F. Soil pollution indices and health risk assessment of metal(loid)s in industrial areas. *Scientific Reports, Nature*. 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59450-4>.

References

Hudkov, I.M., Kashparov, V.O., & Pareniuk, O.Yu. (2019). Radioekologichnyi monitorynh: navchalnyi posibnyk [Radioecological monitoring: textbook]. Kyiv [in Ukrainian].

Ivashchenko, T.H., & Pushkarova, I.D. (2014). Vyznachennia zabrudniuiuchykh rehovyn hruntiv terytorii promyslovykh pidpriemstv ta identyfikatsiia yikh ekolohichnoi nebezpeky [Determination

of pollutants in soils of industrial enterprises' territories and identification of their environmental hazard]. *Visnyk Poltavskoi derzhavnoi ahrarnoi akademii* [Bulletin of Poltava State Agrarian Academy], (4), 102–105 [in Ukrainian].

Kabinet Ministriv Ukrainy (2021). Pro zatverdzhennia normatyviv hrychno dopustymykh kontsentratsii nebezpechnykh rechovyn u hruntakh, a takozh pereliku takykh rechovyn: postanova vid 15 hrudnia 2021 r. № 1325 [On approval of the standards for maximum permissible concentrations of hazardous substances in soils and the list of such substances: resolution № 1325 of December 15, 2021]. Ofitsiyni visnyk Ukrainy [Official Bulletin of Ukraine], (101). [Electronic resource] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1325-2021-п> (access date 03.03.2025) [in Ukrainian].

Kroik, H.A. (2011). Toksykologichni aspekty nakopychennia ta rozpodilu vazhkykh metaliv u hruntakh promyslovykh ahlomeratsii [Toxicological aspects of the accumulation and distribution of heavy metals in soils of industrial agglomerations]. In *Bioriznomanittia ta rol tvaryn v ekosystemakh: Materialy VI Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii* [Biodiversity and the role of animals in ecosystems: Proceedings of the VI International Scientific Conference]. Dnipro: Vydavnytstvo DNU. pp. 15–18 [in Ukrainian].

Kuzenko, A.A., Diudukh, Ya.P., Onyshchenko, V.A., & Sheffer, Ya. (Eds.). (2018). Natsionalnyi katalog biotopiv Ukrainy [National catalog of biotopes of Ukraine]. Kyiv: FOP Klymenko Yu.Ya. 442 p. [in Ukrainian].

Soloviova, A., & Khomiak, I.V. (2021). Povedinkovi stratehii invaziinykh vydiv roslyn [Behavioral strategies of invasive plant species]. *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsia здobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh "Stalyi rozvytok krainy v ramkakh Yevropeiskoi intehratsii"* [Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Higher Education Students and Young Scientists "Sustainable Development of the Country within the Framework of European Integration"]. Zhytomyr: ZhDTU [in Ukrainian].

Tararai, A.M., & Khomiak, I.V. (2019). Invaziina flora fitotsenoziv klasu Artemisietea vulgaris Lonm. Rrsa et R. TX. 1950 mista Zhytomyr [Invasive flora of phytocenoses of the class Artemisietea vulgaris Lonm. Rrsa et R. TX. 1950 in Zhytomyr city]. *Vseukrainska naukovo-praktychna konferentsia здobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh "Stalyi rozvytok krainy v ramkakh Yevropeiskoi intehratsii"* [Proceedings of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Higher Education Students and Young Scientists "Sustainable Development of the Country within the Framework of European Integration"]. Zhytomyr [in Ukrainian].

Khomiak, I.V., & Burlaka, V.A. (2005). Kharakterystyky ekosystem Slovechansko-Ovrutskoho kriazhu, yak obiektiv i kormovoi bazy bdzhilnytstva [Characteristics of the ecosystems of the Slovechansko-Ovruch Ridge as objects and a forage base for beekeeping]. *Visnyk DAU* [Bulletin of DAU], 2, 23–252 [in Ukrainian].

Khomiak, I.V. (2018). Vplyv invazii vydiv-transformeriv na dynamiku roslynnosti perelohiv Ukrainskoho Polissia [Influence of invasions of transformer species on the dynamics of vegetation in fallows of Ukrainian Polissia]. *Bioresursy i pryrodokorystuvannia* [Bioresources and Nature Management], 10 (1–2), 29–35 [in Ukrainian].

Khomiak, I.V. (2022). Syntaksonomiia vidnovliuvanoi roslynnosti karieriv Tsentralnoho Polissia [Syntaxonomy of the regenerating vegetation of the quarries of the Central Polissia]. *Ukrainskyi botanichnyi zhurnal* [Ukrainian botanical journal], 79 (3), 142–153. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj79.03.142> [in Ukrainian].

Khomiak, I.V., & Khomiak, O.I. (2024). Potentsial spontannoho terraforminhu landshaftiv sukhodolu z pozytsii suchasnoi teorii dynamiky ekosystem [Potential for spontaneous terraforming of terrestrial landscapes from the perspective of modern ecosystem dynamics theory]. *Ukrainskyi zhurnal pryrodnychych nauk* [Ukrainian Journal of Natural Sciences], 8, 289–299. <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.8.2024.30> [in Ukrainian].

European Environment Agency (2021). Soil pollution and health. [Electronic resource] URL: <https://www.eea.europa.eu/publications/zero-pollution/health/soil-pollution> (access date 26.01.2025) [in English].

Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). The chemical nature and properties of soil contaminants. [Electronic resource] URL: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/fe5df8d6-6b19-4def-bdc6-62886d824574/content/src/html/chapter-02-2.html> (access date 26.01.2025) [in English].

Hennekens, S.M. (2009). TURBOVEG for Windows: A database management system for vegetation data. User's guide. Wageningen : Alterra [in English].

Mohiuddin, K.M., Liu, Z., Yang, W., Zheng, H., & Wang, F. (2024). Soil pollution indices and health risk assessment of metal(loid)s in industrial areas. *Scientific Reports, Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-59450-4> [in English].

Отримано: 25.04.2025

Прийнято: 15.05.2025