

ФОРМУВАННЯ ПРОСТОРОВИХ ГРАДІЄНТІВ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ГРУНТАХ УЖГОРОДСЬКОГО ПОЛІГОНУ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ У РІЗНІ СЕЗОНИ РОКУ

FORMATION OF SPATIAL GRADIENTS OF HEAVY METALS IN SOILS OF THE UZHGOROD MUNICIPAL WASTE LANDFILL DURING DIFFERENT SEASONS OF THE YEAR

Дочинець Василь Васильович, аспірант, Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, mr.dochinec@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0007-2119-7382>

<https://doi.org/10.32447/bcet.2026.03>

Анотація. У роботі досліджено формування просторових градієнтів важких металів у грунтах Ужгородського полігону побутових відходів з урахуванням сезонної динаміки. Відбір зразків здійснювали з поверхневого шару ґрунту товщиною 0-20 см у межах полігону. Вміст Pb, As, Cu, Cd та Hg визначали методом атомно-абсорбційної спектрометрії у мг/кг. Встановлено, що розподіл металів має виражену просторову неоднорідність і змінюється протягом року. Найвищі концентрації свинцю та кадмію стабільно фіксуються у центральній частині полігону, де вміст свинцю перевищував 3 мг/кг, а кадмію у літній період досягав 0,09 мг/кг. Цей розподіл вказує на формування локальної зони акумуляції, пов'язаної з накопиченням і міграцією. Для арсену характерна менша варіабельність, що свідчить про його відносну стабільність у ґрунті. Поведінка міді відрізняється від загальної тенденції і, ймовірно, зумовлена її зв'язуванням органікою. Отримані результати показують, що полігон функціонує як просторово неоднорідна система з локальними зонами накопичення та перерозподілу забруднювачів, що має враховуватися при оцінці екологічного стану території та організації її моніторингу.

Ключові слова: важкі метали, ґрунтове забруднення, полігони побутових відходів, просторові градієнти, сезонна динаміка, міграція забруднювачів, фільтрат.

Abstract. The study investigates the formation of spatial gradients of heavy metals in the soils of the Uzhgorod municipal waste landfill with consideration of seasonal dynamics. Soil samples were collected from the surface layer at a depth of 0–20 cm within the landfill area. The concentrations of Pb, As, Cu, Cd, and Hg were determined by atomic absorption spectrometry and expressed in mg/kg. The results revealed a pronounced spatial heterogeneity in the distribution of heavy metals, which varied throughout the year. The highest concentrations of lead and cadmium were consistently recorded in the central part of the landfill, where lead content exceeded 3 mg/kg and cadmium reached 0.09 mg/kg during the summer period. This distribution indicates the formation of a local accumulation zone associated with contaminant accumulation and migration processes. Arsenic was characterized by lower variability, indicating its relative stability in the soil environment. The behavior of copper differed from the general trend and was likely associated with its binding to organic matter. The obtained results demonstrate that the landfill functions as a spatially heterogeneous system with local zones of pollutant accumulation and redistribution, which should be considered in environmental assessment and monitoring organization of the territory.

Keywords: heavy metals, soil contamination, municipal waste landfills, spatial gradients, seasonal dynamics, pollutant migration, leachate.

ВСТУП

Полігони побутових відходів формують специфічне техногенне середовище, у межах якого ґрунтовий покрив зазнає постійного впливу продуктів розкладу відходів. У таких умовах відбувається накопичення широкого спектра забруднювачів, серед яких важкі метали займають особливе місце завдяки здатності до тривалого збереження, біоаккумуляції та токсичній дії на компоненти екосистем. Їх присутність у ґрунті створює ризики не лише для рослинності, але й для трофічних ланцюгів і здоров'я населення.

Дослідження індустріально трансформованих територій західної частини України показують, що поверхневі горизонти ґрунтів є основною зоною акумуляції важких металів, де їх концентрації можуть перевищувати допустимі значення та формувати небезпечні екологічні умови¹. У випадку полігонів побутових відходів ці процеси посилюються утворенням фільтрату, який забезпечує перенесення розчинених форм металів у ґрунтовому середовищі та сприяє їх подальшій міграції^{2,3,4}.

Формування просторового розподілу важких металів у ґрунтах має виражений градієнтний характер. Концентрації окремих елементів зменшуються зі збільшенням відстані від полігону, що підтверджується результатами регресійного аналізу для плумбуму та купруму. При цьому зона впливу може суттєво відрізнитися залежно від властивостей елемента: для плумбуму вона може перевищувати 500 м, тоді як для купруму обмежується десятками метрів^{5,6,7}. Це свідчить про складний характер міграції важких металів та необхідність їх диференційованого аналізу⁸.

Водночас просторовий розподіл забруднювачів визначається не лише віддаленістю від джерела, але й внутрішньою структурою полігону. Нерівномірність розміщення відходів, особливості мікрорельєфу та напрямки руху фільтрату формують локальні зони накопичення та перерозподілу металів у межах відносно невеликих територій. Це призводить до виникнення осередків підвищеного забруднення, які не відображаються при використанні усереднених показників.

Суттєвий вплив на формування просторових градієнтів чинить сезонна мінливість умов середовища. Підвищення кількості опадів сприяє інтенсифікації процесів вилуговування та перенесення металів із масиву відходів у ґрунтовий покрив, тоді як температурні зміни впливають на їх біодоступність і форми перебування. У результаті просторовий розподіл важких металів змінюється протягом року, відображаючи динамічний характер їх міграції.

Додатковим фактором є геохімічні властивості ґрунтів. За умов тривалого техногенного навантаження відбувається зниження їх буферної ємності, що супроводжується підвищенням

¹ Mandryk, O., & Radlovska, K. Contamination of soils with heavy metals in the industrialized region of Western Ukraine. *Geomatics and Environmental Engineering*, 2013. No. 7(1). P. 75–84. URL: <https://doi.org/10.7494/GEOM.2013.7.1.75>

² Половко, В. В. Вплив кліматичних умов на розвиток рослинності техногенних ландшафтів Малого Полісся у зимовий період. *Вісник ЛНУ ім. І. Франка*, 2009. С. 37–42.

³ 16. Попович, В. В., Кучерявий, В. П. Вплив продуктів горіння полігонів побутових відходів на організм людини та біоту. *Пожежна безпека*, 2012. №20. С. 6–12. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pb_2012_20_12

⁴ Попович, В. В., Кучерявий, В. П. Горіння полігонів твердих побутових відходів як загроза здоров'ю людини та фактор техногенного навантаження на довкілля. *Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету*, 2012. №1. С. 162–166. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vddau_2012_1_39

⁵ Bereziuk, O. V. Regression analysis of petroleum products concentration in the soils of municipal solid waste landfills. *Vinnytsia: Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2022. No. 3. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2022-3-30-35>

⁶ Bereziuk, O. V. Regression dependence of copper concentration in the soil at the offset from the landfill of solid municipal waste. *Vinnytsia: Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2023. No. 3. P. 18–23. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2023-3-18-23>

⁷ Bereziuk, O. V., Lemeshev, M. S., & Dudar, I. N. Regression analysis of the lead concentration in the soil at the distance from the landfills of solid municipal waste. *Vinnytsia: Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, 2022. No. 4. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2022-4-31-36>

⁸ Korol, K., Popovych, V., Tyndyk, A., Voloshynovych, M. Chemical pollution peculiarities of the Nadija mine rock dumps in the Chervonohrad Mining District, Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 2020. No. 14(2). P. 25–34. URL: <https://doi.org/10.33271/mining16.04.071>

рухливості важких металів і їх переходом у ґрунтовий розчин⁹. Це посилює як горизонтальну, так і вертикальну міграцію забруднювачів та ускладнює оцінку їх реального екологічного впливу.

Сучасні оглядові дослідження підтверджують, що забруднення ґрунтів важкими металами у зоні впливу полігонів є глобальною проблемою, яка залежить від комплексу факторів, включаючи відстань до джерела, глибину ґрунту, кліматичні умови та особливості території¹⁰. Незважаючи на це, поєднаний аналіз просторової та сезонної неоднорідності розподілу важких металів, особливо в межах самих полігонів, залишається недостатньо дослідженим.

Ужгородський полігон побутових відходів є типовим прикладом об'єкта з вираженою неоднорідністю умов формування забруднення, що створює передумови для виникнення складної системи просторових градієнтів важких металів. Дослідження цих процесів дозволяє уточнити закономірності їх міграції та підвищити ефективність екологічного моніторингу.

Метою роботи є встановлення закономірностей формування просторових градієнтів важких металів у ґрунтах Ужгородського полігону у різні сезони року та оцінка їх ролі у процесах міграції забруднювачів.

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Полігони побутових відходів є одним із ключових джерел локального техногенного навантаження на ґрунтовий покрив, формуючи складні осередки накопичення токсичних речовин. Особливу небезпеку становлять важкі метали, які характеризуються високою стійкістю, здатністю до біоаккумуляції та довготривалим впливом на екосистеми. У межах полігонів відбувається не лише їх накопичення, але й активна міграція під впливом фільтрату, що призводить до формування просторово неоднорідних зон забруднення. В умовах змін кліматичних параметрів та інтенсифікації техногенного навантаження особливого значення набуває врахування сезонної динаміки розподілу забруднювачів. Саме сезонні коливання гідротермічних умов визначають інтенсивність процесів вилуговування, перенесення та трансформації важких металів у ґрунтовому середовищі. Незважаючи на значну кількість досліджень, більшість із них зосереджена на оцінці загального рівня забруднення або градієнтів за межами полігонів. Внутрішня просторово-сезонна структура розподілу важких металів у межах самих полігонів залишається недостатньо вивченою, що обумовлює актуальність даного дослідження.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Проблематика забруднення ґрунтів важкими металами в зоні впливу полігонів побутових відходів широко висвітлена у сучасних наукових працях. Дослідження¹¹ демонструють наявність чіткої залежності концентрацій металів від відстані до полігону, що підтверджує формування просторових градієнтів забруднення. При цьому встановлено, що різні елементи характеризуються відмінними радіусами міграції та інтенсивністю накопичення.

У роботах¹² акцентується увага на впливі сезонних факторів на зміну концентрацій важких металів, зокрема підвищення їх рухомості внаслідок зволоження та температурних коливань.

⁹ Popovych, V., Petrushka, I., Stepova, K., Korol, K. Solid waste management as part of sustainable development of Lviv (Ukraine). *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2021. No. 22(5). P. 12–17. URL: <https://doi.org/10.129/12/27197050/139785>

¹⁰ Korol, K. A., Popovych, V. V. et al. Chemical content of landfill neoreliefs in the territory of the Subcarpathia Forestry District of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*, 2022. No. 23(12). P. 233–253. URL: <https://doi.org/10.12911/22998993/153457>

¹¹ Bereziuk, O. V. Regression analysis of petroleum products concentration in the soils of municipal solid waste landfills. Vinnytsia: Scientific Works of Vinnytsia National Technical University, 2022. No. 3. P. 1–6. URL: <https://doi.org/10.31649/2307-5392-2022-3-30-35>

¹² Marzieh, S., Mirseyed Hosseini, H., Sarmadiyan, F., Gilkes, R. J., & Prakongkep, N. Variation in soil heavy metal concentrations around and downstream of a municipal waste landfill, 2010. URL: <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113345952>

Водночас дослідження¹³ підкреслюють роль фізико-хімічних властивостей ґрунтів у формуванні міграційної здатності металів та їх фіксації у різних формах.

Окремі дослідження, проведені для території України¹⁴, підтверджують наявність підвищених концентрацій важких металів у межах техногенно трансформованих ландшафтів, однак переважно зосереджені на загальній оцінці забруднення без детального аналізу внутрішньої просторової структури полігонів. Існуючі наукові підходи не повною мірою враховують поєднаний вплив просторової неоднорідності та сезонної динаміки, що обмежує можливості комплексної оцінки екологічного стану ґрунтів полігонів.

НОВИЗНА

Наукова новизна полягає у встановленні закономірностей формування просторових градієнтів важких металів безпосередньо в межах полігону побутових відходів з урахуванням сезонної мінливості умов середовища.

Вперше для Ужгородського полігону побутових відходів встановлено закономірності формування локальних зон акумуляції важких металів у межах досліджуваної території та виявлено суттєві відмінності у просторовій структурі розподілу окремих елементів. Доведено визначальну роль сезонних факторів у процесах перерозподілу металів у ґрунтовому середовищі, що проявляється у зміні інтенсивності їх міграції та накопичення протягом року. На основі поєднання просторових і часових характеристик забруднення ідентифіковано ділянки з підвищеним рівнем екологічного ризику, що свідчить про складний та динамічний характер функціонування полігону як джерела техногенного навантаження. Отримані результати розширюють уявлення про полігони побутових відходів як складні динамічні геохімічні системи.

МЕТОДОЛОГІЧНЕ АБО ЗАГАЛЬНОНАУКОВЕ ЗНАЧЕННЯ

Методологічне значення дослідження полягає у застосуванні комплексного підходу до оцінки забруднення ґрунтів, що поєднує просторовий аналіз із урахуванням сезонної динаміки змін концентрацій важких металів. Такий підхід дозволяє підвищити точність оцінки екологічного стану територій полігонів, забезпечує можливість ідентифікації локальних зон підвищеного техногенного навантаження та врахування динамічного характеру міграції забруднювачів у часі. Водночас деталізація просторово-часових параметрів забруднення створює передумови для удосконалення системи екологічного моніторингу. Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості їх використання при розробці заходів локалізації забруднення, плануванні моніторингових досліджень та оцінці екологічних ризиків у межах полігонів побутових відходів.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Дослідження проведено на території Ужгородського полігону побутових відходів, який є джерелом локального техногенного впливу на ґрунтовий покрив. Для оцінки просторового розподілу важких металів було обрано ділянки, розташовані у різних частинах полігону, зокрема центральній, північній, південній, західній та східній, що дозволяє врахувати просторову неоднорідність умов формування забруднення.

¹³ Lysychenko, G., Kuraieva, I., Samchuk, A., Manichev, V., Voitiuk, Y., & Matvienko, O. Heavy metals in soils under the heel of heavy industry. In Environmental issues and management of waste in energy and mineral production, 2017. P. 203–211. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-45417-7_19

¹⁴ Telyak, O., Popovych, V., Zachko, O., Korol, K. Physico-chemical properties of peatland located in the impact zone of municipal landfill. E3S Web of Conferences, 2020. No. 174, 02006. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017402006>

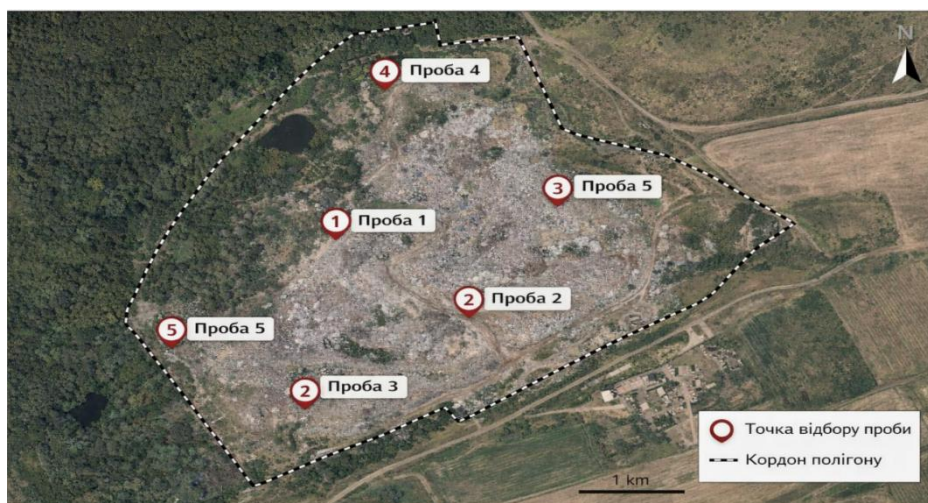


Рисунок 1. Просторове розміщення точок відбору ґрунтових проб у межах Ужгородського полігону побутових відходів (горизонт 0–20 см)

Відбір ґрунтових зразків здійснювали з поверхневого шару глибиною 0–20 см, який є найбільш чутливим до техногенного навантаження та відображає сучасний стан забруднення. Усі точки відбору розміщені в межах одного полігону, що забезпечувало співставлення кліматичних умов та дозволяло інтерпретувати виявлені відмінності як результат локальних процесів.

Дослідження проводили у різні сезони року, а саме в осінній, весняний та літній періоди, що дало змогу оцінити вплив сезонної мінливості гідрометеорологічних факторів на формування просторових градієнтів важких металів. Відбір зразків у кожному сезоні здійснювали за однаковою методикою, що забезпечило коректність порівняння отриманих результатів.

Вміст важких металів у ґрунтах визначали методом атомно-абсорбційної спектрометрії відповідно до вимог ДСТУ ISO 11047:2005. Аналіз проводили для свинцю (Pb), арсену (As), купрум (Cu), кадмію (Cd) та ртуті (Hg). Результати визначення наведені у мг/кг сухої маси ґрунту. Вибір досліджуваних елементів обумовлений їх поширеністю у складі побутових відходів та високою екологічною значущістю¹⁵.

Оцінку рівня забруднення здійснювали шляхом порівняння отриманих значень із гранично допустимими концентраціями, встановленими згідно з Наказом МОЗ України № 1596 від 14.07.2020 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті»¹⁶. Нормативні значення ГДК для досліджених елементів становлять: Pb – 32,0 мг/кг, Cd – 0,5 мг/кг, Hg – 2,1 мг/кг, As – 2,0 мг/кг, Cu – 33,0 мг/кг.

Для обробки та інтерпретації результатів застосовували порівняльний аналіз, що дозволив оцінити відмінності між окремими ділянками полігону та сезонними періодами. Просторові градієнти визначали шляхом зіставлення концентрацій важких металів у різних частинах полігону, а сезонну динаміку - шляхом аналізу їх змін у часі.

Отримані дані розглядали з позиції оцінки екологічного ризику, що дозволило визначити ділянки з підвищеним рівнем техногенного навантаження та потенційною небезпекою для довкілля.

¹⁵ Skrobala, V., Popovych, V., Pinder, V. Ecological patterns for vegetation cover formation in the mining waste dumps of the Lviv-Volyn coal basin. *Mining of Mineral Deposits*, 2020. No. 14. P. 119-127. URL: <https://10.33271/mining14.02.119>

¹⁶ Міністерство охорони здоров'я України. Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті (Наказ № 1596 від 14.07.2020). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>

Свинець характеризується найбільш вираженим просторовим розподілом. Максимальні концентрації стабільно фіксуються в центральній частині полігону в усі досліджувані періоди. При цьому спостерігається чітка сезонна тенденція до зростання його вмісту від осені до літа. Така динаміка свідчить про поступове накопичення елемента у зоні, де відбувається інтенсивна акумуляція фільтрату та обмежене вимивання. У південній та західній частинах значення є дещо нижчими, однак зберігають підвищений рівень, що вказує на поширення забруднення за межі центральної ділянки. Найменші концентрації зафіксовані у північній та східній частинах, що може бути пов'язано з кращими умовами дренажу або меншою інтенсивністю накопичення відходів (рис. 2)

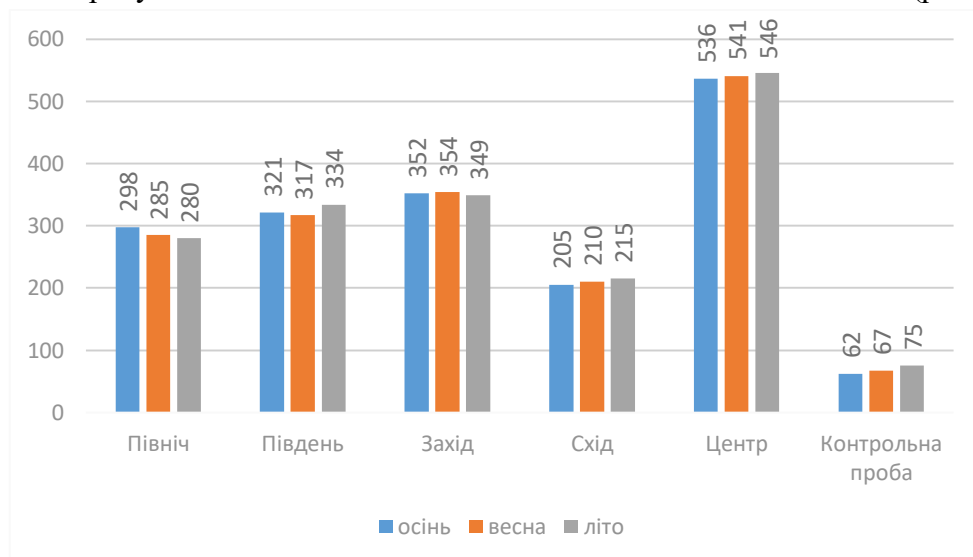


Рисунок 2. Просторово-сезонний розподіл концентрації Pb (мг/кг) у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів

Арсен демонструє більш рівномірний розподіл у межах полігону (рис. 3). Його концентрації коливаються у вузькому діапазоні та не мають різко виражених сезонних піків. Водночас простежується тенденція до дещо підвищених значень у центральній та західній частинах полігону. Така поведінка може бути зумовлена низькою рухомістю арсену у ґрунтового середовищі та його здатністю до фіксації у мінеральній матриці. Відсутність різких змін у часі вказує на стабільний характер його накопичення.

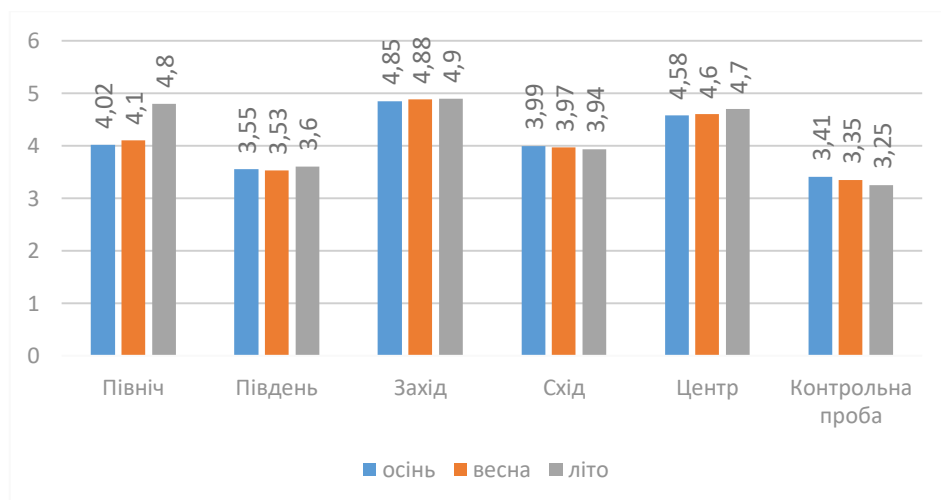


Рисунок 3. Просторово-сезонний розподіл концентрації As (мг/кг) у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів

Розподіл купруму суттєво відрізняється від інших досліджених елементів (рис. 4). Найвищі концентрації зафіксовані у південній частині полігону, що може бути пов'язано з локальними особливостями накопичення відходів або специфікою їх складу. У більшості точок спостерігається тенденція до зниження вмісту купруму у весняно-літній період порівняно з осіннім. Це може свідчити про її перехід у менш рухомі форми або зв'язування з органічною речовиною, яка активно трансформується в теплий період. Таким чином, для купруму характерна не лише просторова, але й хімічно обумовлена варіабельність.

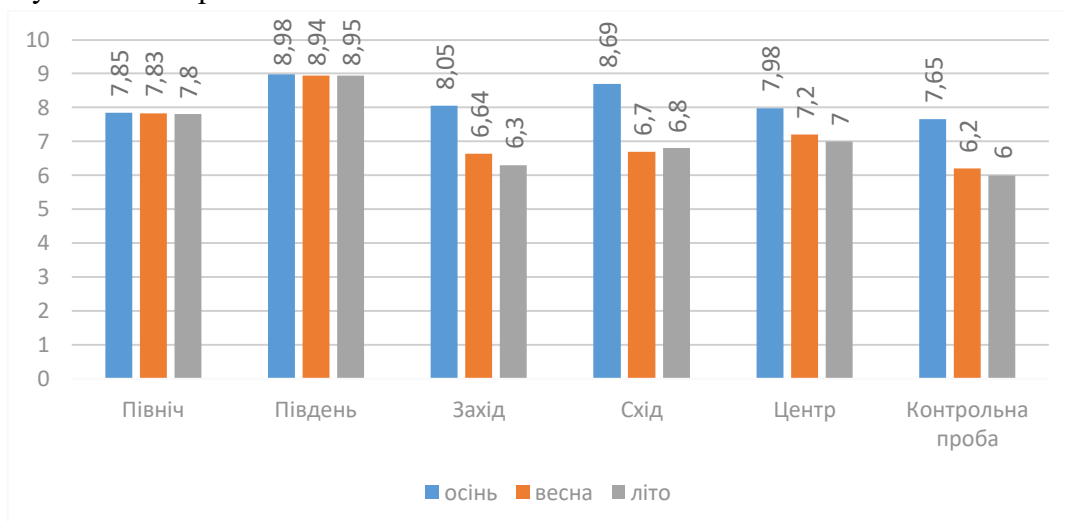


Рисунок 4. Просторово-сезонний розподіл концентрації Cu (мг/кг) у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів

Кадмій є найбільш чутливим до сезонних змін елементом (рис. 5). Як показали аналізи у центральній частині полігону його концентрація різко зростає у літній період, досягаючи максимальних значень серед усіх досліджених металів. Така поведінка свідчить про активізацію процесів міграції під впливом температури та змін водного режиму. У інших частинах полігону, концентрації залишаються відносно стабільними, що підкреслює локалізований характер накопичення. Висока варіабельність кадмію вказує на його значну рухомість та екологічну небезпеку.

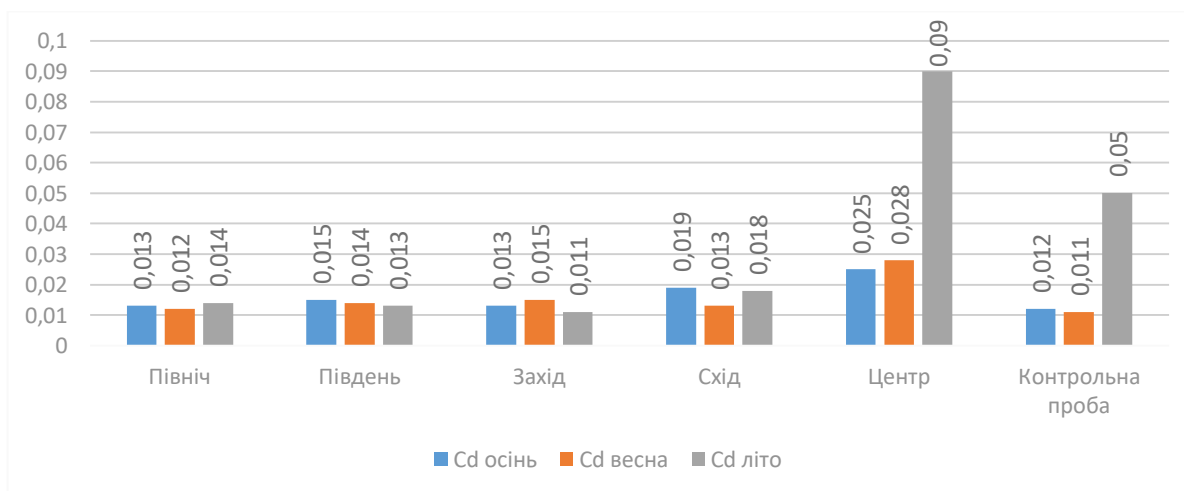


Рисунок 5. Просторово-сезонний розподіл концентрації Cd (мг/кг) у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів

Ртуть, на відміну від інших елементів, характеризується практично однорідним розподілом (рис. 6). Її концентрації залишаються стабільними у всіх точках та у всі сезони, без виражених максимумів або мінімумів. Це може свідчити про низьку інтенсивність надходження або про її переважання у малорухомих формах, що не беруть участі в активній міграції. У результаті ртуть не формує чітких просторових градієнтів у межах досліджуваної території.

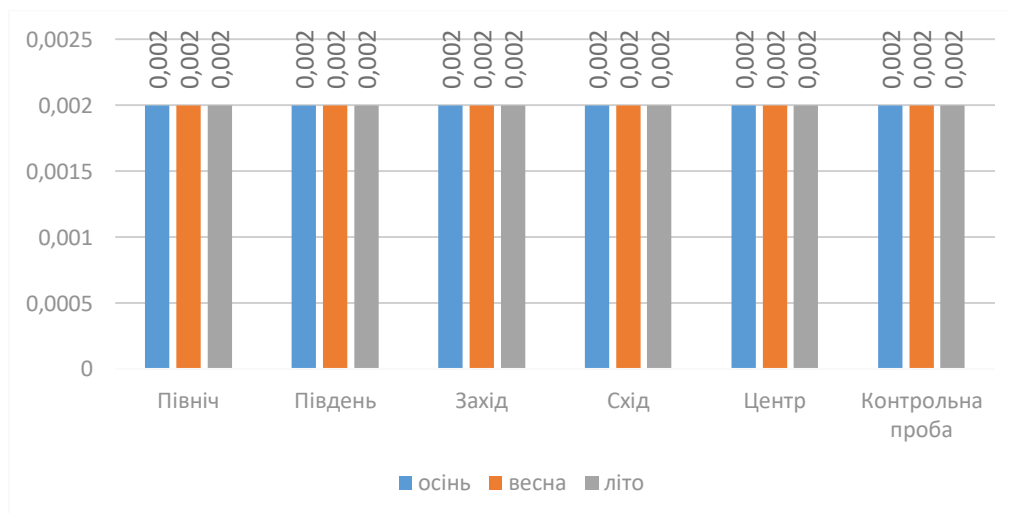


Рисунок 6. Просторово-сезонний розподіл концентрації Hg (мг/кг) у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів

Отримані результати свідчать, що розподіл важких металів у ґрунтах Ужгородського полігону побутових відходів, має чітко виражений просторовий характер із формуванням локальних зон підвищених концентрацій. Найбільші значення більшості елементів зафіксовані у центральній частині полігону. Зокрема, концентрація плумбуму досягає 536–546 мг/кг у літній період, що суттєво перевищує показники інших ділянок і свідчить про інтенсивне накопичення у цій зоні. Такий рівень вказує на формування стабільного осередку акумуляції забруднювачів.

Периферійні ділянки характеризуються нижчими концентраціями плумбуму, однак їх значення залишаються високими та коливаються у межах 280–352 мг/кг, що свідчить про поширення забруднення за межі центральної частини полігону. Найменші значення зафіксовані у контрольній пробі – 62–75 мг/кг, проте навіть вони відображають підвищений рівень техногенного впливу.

Розподіл арсену є більш рівномірним. Його концентрації коливаються у вузькому діапазоні від 3,25 до 4,90 мг/кг. Максимальні значення 4,85–4,90 мг/кг зафіксовані у західній частині полігону, тоді як у південній частині вони знижуються до 3,5–3,6 мг/кг. Незважаючи на меншу варіабельність, спостерігається стабільне перевищення контрольних значень, що свідчить про постійний характер забруднення.

Купрум демонструє іншу закономірність розподілу. Найвищі концентрації зафіксовані у південній частині полігону та становлять 8,98–9,14 мг/кг. У той же час у західній частині спостерігається зниження до 6,3–6,85 мг/кг. Для більшості ділянок характерне зменшення концентрацій у весняно-літній період порівняно з осіннім, що вказує на зміну форм перебування елемента або його перерозподіл у ґрунтового середовищі.

Кадмій характеризується найбільш вираженою сезонною динамікою. У центральній частині полігону його концентрація зростає з 0,025–0,028 мг/кг у весняний період, до 0,09 мг/кг у літній. Це є максимальним значенням серед усіх досліджених ділянок і вказує на активізацію процесів

міграції. В інших частинах полігону концентрації кадмію залишаються значно нижчими та коливаються у межах 0,011-0,019 мг/кг, що підкреслює локальний характер його накопичення.

Ртуть демонструє практично повну стабільність. У всіх досліджених точках та у всі сезони її концентрація становить близько 0,002 мг/кг, без суттєвих відхилень. Це свідчить про відсутність виражених процесів накопичення або міграції цього елемента в межах полігону.

Загалом результати вказують на формування чіткої структури забруднення, у якій центральна частина полігону виконує функцію основної зони акумуляції, тоді як периферійні ділянки характеризуються менш інтенсивним, але стійким забрудненням. Сезонні зміни, особливо у літній період, посилюють контраст між окремими ділянками, що свідчить про активізацію процесів перерозподілу важких металів у ґрунтовому середовищі.

Важливим аспектом було проведення оцінки екологічного ризику. Оцінювання проводилось шляхом порівняння отриманих концентрацій важких металів у ґрунтах із гранично допустимими концентраціями, встановленими відповідно до чинних нормативів України (Наказ МОЗ України № 1596 від 14.07.2020 р.). Це дозволяє визначити ступінь техногенного навантаження на ґрунтовий покрив та виявити ділянки з потенційно небезпечним рівнем забруднення¹⁷.

Аналіз отриманих даних показав, що для плумбуму у центральній частині полігону спостерігається суттєве перевищення нормативного значення – 32 мг/кг, особливо у літній період. Високі концентрації цього елемента також фіксуються у південній та західній частинах, що свідчить про формування стійкої зони підвищеного ризику. Такий рівень забруднення може негативно впливати на біоту ґрунту та створювати передумови для включення свинцю у трофічні ланцюги.

Для кадмію, який характеризується високою токсичністю навіть у незначних концентраціях, у центральній частині полігону зафіксовано перевищення гранично допустимих концентрацій – 0,5 мг/кг, що особливо проявляється у літній період. З огляду на високу рухомість цього елемента, його накопичення створює підвищений екологічний ризик, пов'язаний із можливим міграційним перенесенням у суміжні компоненти довкілля.

Концентрації купруму у більшості випадків не перевищують нормативного значення у 33 мг/кг, однак на окремих ділянках, зокрема у південній частині полігону, спостерігається наближення до граничних рівнів. Це вказує на потенційну небезпеку локального накопичення, особливо за умов зміни фізико-хімічних властивостей ґрунту.

Арсен характеризується концентраціями, що у ряді випадків перевищують встановлене нормативне значення 2,0 мг/кг, що свідчить про наявність додаткових джерел надходження або про особливості геохімічного середовища. З урахуванням токсичних властивостей цього елемента навіть незначні перевищення можуть мати екологічне значення.

Ртуть не демонструє перевищення гранично допустимих концентрацій – 2,1 мг/кг у жодній із досліджених ділянок, що дозволяє оцінити рівень її впливу як відносно низький у межах даного полігону.

Загалом найбільш небезпечними з точки зору екологічного ризику є центральні ділянки полігону, де спостерігається одночасне накопичення кількох важких металів та перевищення нормативних значень. Поєднання високих концентрацій, сезонної динаміки та підвищеної рухомості окремих елементів створює умови для формування зон підвищеного екологічного навантаження.

¹⁷ Міністерство охорони здоров'я України. Гігієнічні регламенти допустимого вмісту хімічних речовин у ґрунті (Наказ № 1596 від 14.07.2020). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0722-20#Text>

Отримані результати свідчать про необхідність систематичного моніторингу ґрунтів полігону та прилеглих територій, а також впровадження заходів, спрямованих на зменшення міграції важких металів і локалізацію зон їх накопичення.

ГОЛОВНІ ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень встановлено, що ґрунти Ужгородського полігону твердих побутових відходів характеризуються вираженою просторовою та сезонною неоднорідністю розподілу важких металів. Виявлено формування чітких градієнтів забруднення, при яких максимальні концентрації більшості елементів виявлені у центральній частині полігону. Для плумбуму концентрації досягають діапазону 536-546 мг/кг, що свідчить про інтенсивне накопичення у зоні акумуляції фільтрату.

Показано, що периферійні ділянки полігону характеризуються нижчими, та все ж стабільно підвищеними концентраціями (для плумбуму у межах 280-352 мг/кг), що підтверджує поширення забруднення за межі центральної зони та формування стійкого просторового градієнта.

Встановлено суттєвий вплив сезонних умов на перерозподіл важких металів. У теплий період відбувається активізація процесів міграції, що найбільш виражено для кадмію, концентрації якого у центральній частині зростають до 0,09 мг/кг. Це вказує на його високу рухомість і чутливість до змін температури та водного режиму.

Показано, що поведінка металів має диференційований характер. Плумбум і кадмій формують зони локального накопичення, арсен демонструє стабільно підвищений рівень – 3,25-4,90 мг/кг без різких сезонних змін, тоді як ртуть характеризується практично незмінною концентрацією – 0,002 мг/кг, що свідчить про її низьку рухомість. Мідь проявляє змінну поведінку з тенденцією до зниження у теплий період. Оцінка екологічного ризику показала, що у межах полігону формуються зони підвищеного техногенного навантаження з перевищенням гранично допустимих концентрацій для плумбуму, кадмію та арсену. Найбільш небезпечною є центральна частина полігону, де поєднуються високі концентрації та активні процеси міграції.

Встановлено, що Ужгородський полігон побутових відходів функціонує як динамічна геохімічна система, у якій відбувається не лише накопичення, але й активний перерозподіл важких металів. Отримані результати підтверджують необхідність урахування просторової та сезонної мінливості при оцінці стану ґрунтів і свідчать про доцільність посилення моніторингу та впровадження заходів із локалізації забруднення.