УДК 504.5:631.417.2:581.522.4
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.6-69.30

ДІАГНОСТИКА ФІТОТОКСИЧНОСТІ ҐРУНТІВ АГРОЛАНДШАФТІВ У ЗОНАХ ІНТЕНСИВНОГО АЕРОТЕХНОГЕННОГО ЗАБРУДНЕННЯ

Кучеренко М.А. (orcid.org/0009-0004-2371-8135)
Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20300, м. Умань
farro.vladimir.kucherenko@gmail.com

Представлено результати комплексного агроекологічного дослідження просторово-профільного розподілу та фітотоксичного ефекту аеротехногенних викидів підприємств металургійного профілю на прилеглі агроекосистеми. На прикладі зони впливу металургійного виробництва з переробки рудної сировини доведено, що верхній орний шар ґрунту агроценозів слугує основним депонуючим середовищем для важких металів (нікелю, заліза, хрому та кобальту). Застосування методу біоіндикаційного тестування на основі ростових реакцій тест-культури *Triticum aestivum* L. дозволило встановити критичне пригнічення морфометричних і біометричних параметрів проростків у ближній буферній зоні (50–100 м), де схожість насіння знижувалася до 74,0 %, енергія проростання – до 63,0 %, а індекс гермінації досягав критичного показника 26,18 %, що свідчить про глибоку деструкцію біологічної активності субстрату. За допомогою побудови регресійних моделей із високими значеннями коефіцієнтів детермінації математично обґрунтовано нелінійний характер затухання техногенного навантаження в міру віддалення від джерела емісії. Установлено, що на відстані понад 3–5 км показники фітотоксичності та біотичної активності агроценозів поступово наближаються до фонових значень завдяки природній буферній ємності ґрунтового покриву. Отримані експериментальні дані створюють надійне теоретико-методологічне підґрунтя для удосконалення системи регіонального агроекологічного моніторингу та розробки критеріїв експрес-діагностики ранніх стадій техногенної деградації ґрунтів. Установлені просторові закономірності та математичні моделі дозволяють здійснювати об'єктивне зонування агроекологічного ризику й прогнозувати рівень фітобезпеки сільськогосподарської продукції в зонах впливу металургійних підприємств. Це дає змогу обґрунтувати диференційовані регламенти раціонального землекористування, а також розробити адресні заходи з хімічної меліорації та фіторекультивації виснажених агроландшафтів в умовах інтенсивного промислового впливу.
Ключові слова: агроекосистема, важкі метали, аеротехногенне забруднення, фітотоксичність, біоіндикація, *Triticum aestivum* L., індекс гермінації, регресійне моделювання.

Diagnostics of Agro-Landscape Soil Phytotoxicity in Areas of Intensive Airborne Industrial Pollution. Kucherenko M.
The article presents the results of a comprehensive agroecological study on the spatial-profile distribution and phytotoxic effects of airborne industrial emissions from metallurgical facilities on adjacent agroecosystems. Taking the impact zone of metallurgical production processing ore raw materials as an example, it has been proven that the upper arable soil layer of agrocoenoses serves as the primary depositing medium for heavy metals (nickel, iron, chromium, and cobalt). The application of bioindication testing based on the growth responses of the test crop *Triticum aestivum* L. revealed a critical inhibition of seedling morphometric and biometric parameters in the near buffer zone (50–100 m), where seed germination decreased to 74.0%, germination energy to 63.0%, and the germination index reached a critical level of 26.18%, indicating profound degradation of the biological activity of the substrate. By constructing regression models with high coefficients of determination, the non-linear attenuation pattern of industrial load with increasing distance from the emission source was mathematically substantiated. It was established that at a distance exceeding 3–5 km, the phytotoxicity and biotic activity metrics of agrocoenoses gradually approach baseline background values due to the natural buffering capacity of the soil cover. The obtained experimental data provide a reliable theoretical and methodological foundation for improving the regional agroecological monitoring system and developing criteria for rapid diagnostics of the early stages of soil technological degradation. The established spatial patterns and mathematical models enable objective agroecological risk zoning and forecasting of agricultural product phytosafety levels in the impact zones of metallurgical enterprises. This allows for the justification of differentiated regulations for rational land use, as well as the development of targeted measures for chemical reclamation and phytoremediation of depleted agrolandscapes under intensive industrial pressure. *Key words:* agroecosystem, heavy metals, airborne industrial pollution, phytotoxicity, bioindication, *Triticum aestivum* L., germination index, regression modeling.

Постановка проблеми. Інтенсивна діяльність підприємств металургійного комплексу є одним із провідних чинників техногенної трансформації довкілля, що призводить до порушення екологічної рівноваги та деградації природних і антропогенно змінених екосистем [1]. Особливу екологічну небезпеку становлять виробництва з переробки окиснених нікелевих руд, функціонування яких супроводжується потужною емісією дрібнодисперсного пилу, рудних аерозолів та газів, що містять токсичні сполуки важких металів [2].

Ґрунтовий покрив прилеглих агроценозів тривалий час акумулює специфічні полютанти, серед яких ключове місце посідають нікель, залізо, хром та кобальт. Накопичення цих металів у верхньому орному шарі призводить до зростання концентрації

© Кучеренко М.А., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

їхніх рухомих, біодоступних форм, що викликає вторинний токсикоз ґрунтового розчину, пригнічує біологічну активність субстрату та спричиняє глибокі порушення фізіолого-біохімічних процесів у рослинних організмах [3].

Актуальність дослідження. Актуальність обраної теми зумовлена необхідністю забезпечення екологічної безпеки агропромислового виробництва та раціонального землекористування в зонах тривалого техногенного впливу промислових підприємств, зокрема феронікелевого комбінату. В умовах сучасного екологічного стану особливої гостроти набуває проблема розробки швидких, високочутливих та надійних методів діагностики ранніх стадій техногенної деградації ґрунтів і оцінки їх буферної спроможності стосовно забруднення важкими металами.

Застосування традиційних аналітичних методів визначення валового вмісту токсикантів не завжди дозволяє об'єктивно оцінити їхню реальну біологічну небезпеку для живих організмів, що робить вкрай затребуваним упровадження інтегральних біоіндикаційних підходів на основі аналізу ростових реакцій тест-культур та розрахунку індексів фітотоксичності.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлене дослідження є складовою науково-дослідної роботи кафедри екології Уманського національного університету за темою «Розробка методологічних підходів і практичного механізму екологічно-збалансованого природокористування» (державний реєстраційний номер 0108U009772).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблема техногенного забруднення агроекосистем важкими металами та їхнього фітотоксичного впливу на сільськогосподарські культури посідає центральне місце у сучасних екологічних, агрохімічних та ґрунтознавчих дослідженнях. Теоретичні та прикладні аспекти акумуляції, міграції та біодоступності важких металів у системі «ґрунт – рослина» детально висвітлено у працях багатьох вітчизняних [4] і зарубіжних науковців [5]. Зокрема, дослідженнями фундаментальних закономірностей трансформації ґрунтового покриву під дією промислового навантаження доведено, що найбільшу екологічну небезпеку становлять рухомі форми металів, які безпосередньо беруть участь у біогеохімічному колообігу та здатні проникати крізь біологічні бар'єри рослинних організмів [6].

У контексті аеротехногенного забруднення агроландшафтів, розташованих у зонах впливу підприємств металургії, науковий інтерес викликають праці, присвячені вивченню специфіки розсіювання металургійного пилу та аерозолів. Дослідження доводять, що функціонування металургійних комплексів супроводжується формуванням стійких локальних та регіональних геохімічних аномалій [7]. У ґрунтах прилеглих агроценозів фіксується інтенсивне накопичення великої кількості полютантів, де основними токсико-екологічними ознаками забруднення виступають нікель, залізо, хром та кобальт [8]. Праці зарубіжних авторів підтверджують, що підвищені концентрації нікелю та хрому в ґрунтовому розчині чинять потужну інгібуючу дію на функціональну активність ґрунтової мікрофлори, знижують ферментативну активність субстрату та викликають стрес у рослинних клітинах [9].

Водночас у сучасній науковій літературі приділяється значна увага вдосконаленню методів екологічної діагностики та оцінки фітотоксичності забруднених ґрунтів. Більшість дослідників сходяться на думці, що виключно фізико-хімічні аналізи валового вмісту важких металів не дають повного уявлення про ступінь їхньої реальної біологічної небезпеки для агрофітоценозів. У зв'язку з цим дедалі більшого значення набувають біоіндикаційні методи із використанням високочутливих тест-культур.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Попри наявність численних праць, присвячених загальним питанням техногенного забруднення довкілля важкими металами, поза увагою науковців досі залишається комплексний аналіз просторово-динамічної трансформації агроекосистем у зоні впливу специфічних викидів підприємств з переробки руд. Більшість існуючих досліджень обмежується констатацією валового вмісту токсикантів у ґрунтах без належного обґрунтування їхньої рухомості та фітотоксичної активності в умовах безпосереднього контакту з рослинними організмами на ранніх етапах онтогенезу.

Новизна. Наукова новизна отриманих результатів полягає у первинному експериментальному обґрунтуванні закономірностей формування фітотоксичного стану ґрунтів агроценозів у градієнтній зоні впливу феронікелевого комбінату із застосуванням інтегральних біоіндикаційних критеріїв. Вперше встановлено математичні залежності між віддаленістю від промислового майданчика комбінату та ступенем інгібування морфометричних параметрів проростків *Triticum aestivum* L., що дозволило чітко розмежувати зони різного ступеня фітотоксичності та довести характер згасання аеротехногенного впливу.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне та загальнонаукове значення отриманих результатів полягає у поглибленні та систематизації теоретичних уявлень про механізми функціонування та адаптаційні можливості агроекосистем в умовах інтенсивного аеротехногенного пресу підприємств гірничо-металургійного профілю. Дослідження розвиває концептуальні заходи агроекологічної діагностики шляхом обґрунтування репрезентативності просторово-градієнтного підходу, який дозволяє розкрити динаміку трансформації ґрунтово-рослинного покриву від осередку викидів до фонових територій.

Викладення основного матеріалу. У ході експериментальних досліджень було здійснено комплексну оцінку еколого-токсичного стану агроекосистем у зоні техногенного впливу викидів Побузького феронікелевого комбінату. Як одне з провідних підприємств гірничо-металургійного комплексу регіону, комбінат здійснює потужне аеротехногенне навантаження на довкілля внаслідок високотемпературної переробки окиснених нікелевих руд із застосуванням пірометалургійних технологій.

Основними джерелами емісії токсикантів є трубчасті обертові печі, рудотермічні електропечі та конверторні відділення, із газопиловими викидами яких у приземний шар атмосфери надходить значна кількість дрібнодисперсного пилу, рудного аерозолю та продуктів згоряння палива. У складі цих викидів переважає широкий спектр важких металів, серед яких ключовими екологічними маркерами є нікель, залізо, хром та кобальт.

Оскільки ґрунтовий покрив прилеглих агроценозів виступає головним тривалим депонуючим середовищем для техногенних аерозолів і випадінь пилового факела, накопичення цих специфічних елементів спричиняє вторинне забруднення ґрунтового розчину та неминуче викликає порушення фізіолого-біохімічних процесів у рослинних організмах.

Для кількісної індикації рівня фітотоксичності ґрунтових субстратів у зоні впливу комбінату було застосовано біоіндикаційний метод на основі тестування ростових реакцій пшениці м'якої (*Triticum aestivum* L.), результати якого в динаміці віддаленості від підприємства наведено в таблиці 1. Аналіз отриманих експериментальних даних засвідчує закономірне пригнічення морфометричних та біометричних параметрів проростків у міру наближення до промислового майданчика комбінату, що відображає ступінь техногенної деградації агрофітоценозів.

Узагальнюючи результати проведених досліджень, слід констатувати, що викиди феронікелевого комбінату формують стійкий техногенний слід, який зумовлює глибоку депресію ростових і формоутворюючих процесів у рослинних організмах. У найближчій буферній зоні (Зона I, 50–100 м) зафіксовано максимальне пригнічення життєздатності тест-культури: схожість насіння знижувалася до 74,0 %, енергія проростання – до 63,0 %, а довжина головного кореня скорочувалася відносно контролю на 64,79%. Такий критичний фітотоксичний ефект пояснюється високою концентрацією рухомих форм важких металів (особливо іонів нікелю та заліза) у ґрунтовому розчині, які безпосередньо контактують із меристематичними тканинами кореневих волосків, блокують мітотичний поділ клітин, інактивують ферментні системи та порушують водний баланс рослин.

Розрахункові показники індексу гермінації підтвердили високу інформативність цього критерію, продемонструвавши його падіння до критичних 26,18 % у безпосередній близькості до підприємства, що свідчить про повну деструкцію біологічної активності субстрату. У міру віддалення до середньої (Зона II, 500–1000 м) та дальньої (Зона III, 3000–5000 м) буферних смуг спостерігається поступове затухання техногенного ефекту: в Зоні III показники схожості та довжини пагонів практично наближаються до фонових значень, складаючи відповідно 91,0% і 11,0 см, а індекс гермінації зростає до 79,83 %.

Для поглибленого аналізу характеру взаємозв'язків між інтенсивністю техногенного пресу феронікелевого комбінату та показниками фітотоксичного ураження тест-культури було побудовано регресійні моделі та графічні залежності (рис. 1–3).

Аналіз побудованих регресійних залежностей із високими значеннями коефіцієнтів детермінації переконливо доводить тісний детермінований зв'язок між віддаленістю агроценозу від джерела емісії та показниками фітотоксичності субстратів. Графічні моделі чітко відображають нелінійний характер затухання техногенного навантаження в міру віддалення від комбінату, де критичні значення індексу гермінації та інгібування росту концентруються переважно в межах ближньої буферної зони, поступово наближаючись до фонових параметрів на відстані понад три кілометри.

Виявлені математичні закономірності зумовлені глибокими фізіолого-біохімічними порушен-

Таблиця 1

Вплив промислових викидів на морфометричні та біометричні показники проростків тест-культури (*Triticum aestivum* L.)

Варіант досліду	Схожість насіння, %	Енергія проростання, %	Довжина проростка, см	Довжина головного кореня, см	Суха маса 100 проростків, г
Контроль (фоновий агроценоз, >15 км)	96,0±1,2	92,0±1,5	12,4±0,4	14,2±0,5	1,85±0,05
Зона I (ближній буферний ряд, 50–100)	74,0±2,4	63,0±2,5	6,2±0,3	5,0±0,4	1,02±0,03
Зона II (середній буферний ряд, 500–1000м)	83,0±1,9	76,0±2,1	8,5±0,3	8,1±0,3	1,34±0,04
Зона III (дальній буферний ряд, 3000–5000м)	91,0±1,5	87,0±1,8	11,0±0,4	12,1±0,4	1,69±0,04

Відмінності вірогідні порівняно з контролем при $p < 0,05$; при $p < 0,01$.

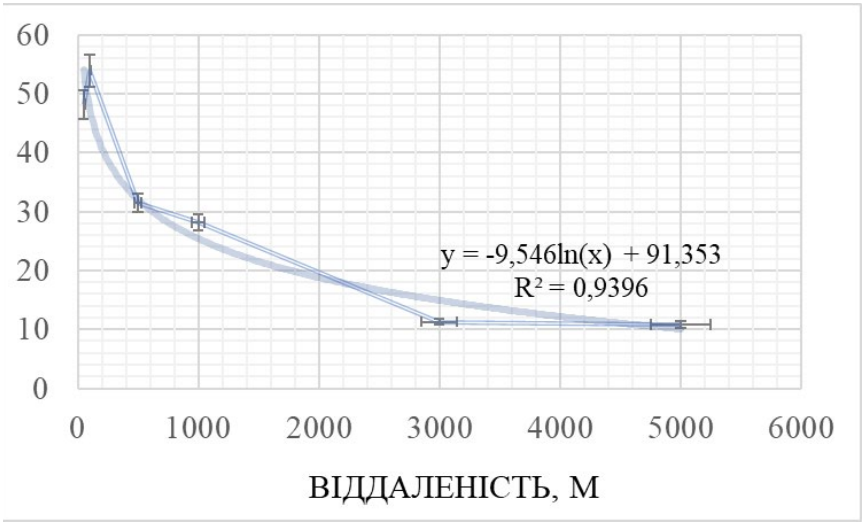

Рис. 1. Інгібування росту пагона залежно від віддаленості від джерела забруднення, %

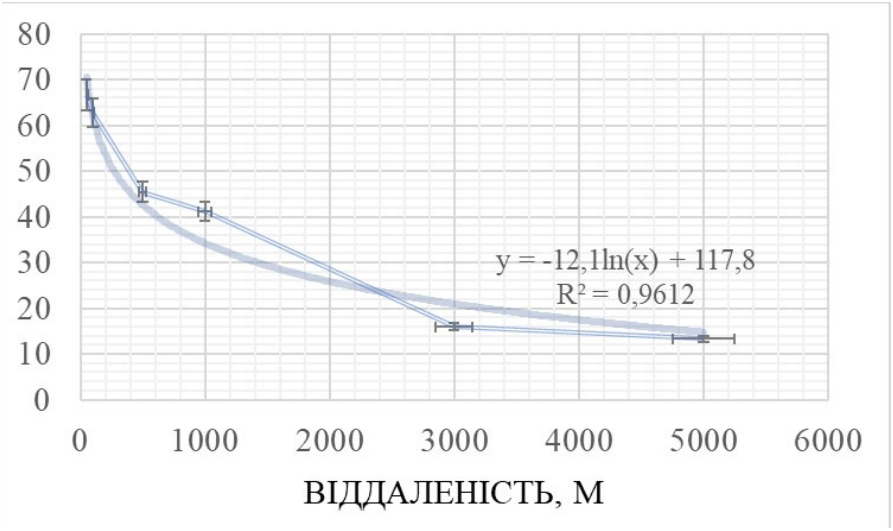

Рис. 2 . Інгібування росту коренів залежно від віддаленості від джерела забруднення, %

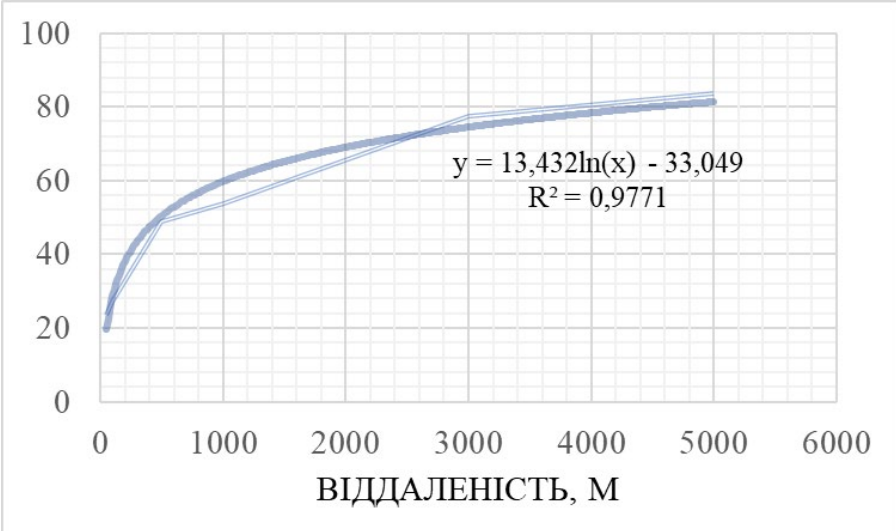

Рис. 3. Значення індексу гермінації залежно від віддаленості від джерела забруднення

ISSN: 2306-9716 (Print), ISSN: 2664-6110 (Online)

нями в рослинних організмах під дією специфічних полютантів феронікелевого виробництва, зокрема іонів нікелю, заліза та хрому. Високі концентрації рухомих форм цих важких металів у ґрунтовому розчині первинної зони спричиняють інактивацію сульфгідрильних груп білків, блокують активність ключових ферментів і гальмують мітотичний поділ клітин у меристематичній зоні корінців. Оскільки коренева система вступає в прямий і безперервний контакт із токсичним середовищем, інгібування її росту значно випереджає пригнічення надземної маси, що підтверджується стійкими параметрами регресійних кривих.

Отримані графічні залежності та високі показники R^2 мають важливе практичне значення для розробки критеріїв екологічного моніторингу й зонування агроекологічного ризику навколо промислових підприємств металургійного профілю. Вони доводять, що ґрунти агроценозів у радіусі до одного кілометра володіють виснаженою буферною ємністю і потребують невідкладних заходів із фіторекультивації та хімічної меліорації. Водночас побудовані моделі дозволяють прогнозувати рівень фітобезпеки сільськогосподарської продукції та розробляти диференційовані регламенти використання земель залежно від ступеня їхнього техногенного трансформування.

Головні висновки. 1. Комплексні дослідження просторово-профільного розподілу та фітотоксичного ефекту викидів феронікелевого комбінату довели, що діяльність промислового підприємства формує стійкий техногенний градієнт в прилеглих агроекосистемах. Основним депонуючим середовищем для важких металів виступає верхній орний шар ґрунту.

2. Використання біоіндикаційного тестування на основі ростових реакцій тест-культури (*Triticum aestivum* L.) підтвердило високу чутливість підземних органів рослин до токсичного пресу. У ближній буферній зоні (50–100 м) зафіксовано критичне пригнічення показників схожості, довжини пагонів і кореневої системи, де індекс гермінації знижується до 26,18 %, що свідчить про сильну фітотоксичність субстрату та порушення функціональної цілісності ґрунтового мікробіоценозу.

3. Побудовані регресійні моделі із високими значеннями коефіцієнтів детермінації математично обґрунтували нелінійний характер затухання техногенного навантаження в міру віддалення від джерела емісії. Установлено, що на відстані понад 3–5 кілометрів показники фітотоксичності та біотичної активності агроценозів наближаються до фонових значень завдяки природній буферній ємності ґрунтового покриву.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективи подальшого використання отриманих результатів полягають у розробці науково обґрунтованих засад регіонального агроекологічного моніторингу та зонування сільськогосподарських угідь, розташованих у зонах впливу підприємств гірничо-металургійного комплексу. Виявлені просторові закономірності розсіювання важких металів та побудовані регресійні моделі дозволяють диференційовано оцінювати ступінь техногенного ризику для агроценозів, що є критично важливим для прийняття управлінських рішень щодо раціонального використання земельного фонду.

Література

1. Xu S., Yun M., Wang Y., Liu K., Wu A., Li S., Su Y., Wang S., Kang H. Heavy Metal Contamination and Risk Assessment in Soil–Wheat /Corn Systems near Metal Mining Areas in Northwestern China. *Biology*, 2025. 14. 1475. https://doi.org/10.3390/biology14111475.
2. Raskin I. Phytoextraction: The use of plants to remove heavy metalsfrom soils. Environ. Sci. Technol., 1995. 29. P. 1232–1238.
3. Liu P., Wu Q., Hu W., Tian K., Huang B., Zhao Y. Effects of atmospheric deposition on heavy metals accumulation in agricultural soils: Evidence from field monitoring and Pb isotope analysis. *Environ. Pollut*., 2023. 330. 121740. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121740.
4. Корсун С.Г., Клименко І.І., Болоховська В.А., Болоховський В.В. Транслокація важких металів у системі «грунт – рослина» за вапнування та впливу біологічних препаратів. *Агроекологічний моніторинг*, 2019. №1. С. 29–35. https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2019.163245.
5. Kabata-Pendias A. Trace Elements in Soils and Plants (4th ed.). CRC Press., 2010. https://doi.org/10.1201/b10158.
6. Kouchou A., Rais N., Elsass F., Duplay J., Fahli N., Ghachtouli N. EL. Effects of long-term heavy metals contamination on soil microbial characteristics in calcareous agricultural lands (Saiss plain, North Morocco). *Journal of materials and Environmental Sciences*, 2017. 8 (2). P. 691–695.
7. Csavina J., Field J., Taylor M. P., Gao S., Landázuri A., Betterton E. A., Sáez A. E. A Review on the Importance of Metals and Metalloids in Atmospheric Dust and Aerosol from Mining Operations. *Science of the Total Environmen*t, 2012. 433. P. 58–73. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.06.013
8. Wang Y., Zhang Z., Li Y., Liang C., Huang H., Wang S. Available heavy metals concentrations in agricultural soils: Relationship with soil properties and total heavy metals concentrations in different industries. *J. Hazard. Mater*., 2024. 471. 134410. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.134410.
9. Jiang W., Meng L., Liu F., Sheng Y., Chen S., Yang J., Mao H., Zhang J., Zhang Z., Ning H. Distribution, source investigation, and risk assessment of topsoil heavy metals in areas with intensive anthropogenic activities using the positive matrix factorization (PMF) model coupled with self-organizing map (SOM). *Environ. Geochem. Health,* 2023. 45. P. 6353–6370. https://doi.org/10.1007/s10653-023-01587-8

Дата першого надходження статті до видання: 16.10.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.11.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 23.11.2026