УДК 504.53.06:550.47(477.46)
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.25

МОНІТОРИНГ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ҐРУНТІВ УРБАНІЗОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ В УМОВАХ ЗЛИВОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Гурський І.М. (orcid.org/0000-0002-3822-3889),
Імамов В.О. (orcid.org/0009-0003-3590-9003)
Уманський національний університет
вул. Інститутська, 1, 20300, м. Умань
gurskyivet@gmil.com, vyacheslav.imamov@gmail.com

Стаття присвячена комплексному аналізу латеральної міграції, перерозподілу та акумуляції екологічно небезпечних полютантів у ґрунтах міста Сміла із застосуванням катенного підходу. Обґрунтовано, що пересічений мікрорельєф міста та гідравлічна енергія поверхневого зливового стоку виступають потужними інтеграційними просторовими регуляторами, які нівелюють первинну мозаїчність техногенної емісії забруднювачів від різних джерел. На основі аналізу трьох моніторингових трансект (Центрально-транспортної, Прибережно-промислової та Магістрально-селитебної) виявлено синхронну висхідну тенденцію накопичення свинцю та цинку від елювіальних до акумулятивних позицій рельєфу. Порівняльний аналіз показав, що найбільшу амплітуду нагромадження металів демонструє Центрально-транспортна трансекта, дещо менші, але аналогічно високі показники характерні для Магістрально-селитебної території, тоді як найменш виражений пік притаманний Прибережно-промисловій зоні.

Встановлено, що максимальні концентрації токсикантів приурочені до локальних геоморфологічних понижень, які зазнають хронічного зливового підтоплення. Доведено існування вираженого ефекту «замулення» низинних зон: вміст фізичної глини (<0,01 мм) тут зростає до 44,2–46,8%, а фракція тонкого мулу (<0,002 мм) збільшується порівняно з вододілами більш ніж удвічі, досягаючи 18,1–19,5%. Така трансформація гранулометричного складу зумовлює підвищення ємності поглинання ґрунтів до 24,1–29,8 мг-екв/100 г та накопичення гумусу (3,89–4,42%). Оцінено екологічні ризики тривалого застою води, який викликає дефіцит кисню та активує відновлювальні процеси, що загрожує руйнуванням сорбційних комплексів і переходом депонованих важких металів у мобільні, високотоксичні рухомі форми. Запропонована методологічна схема дозволяє перейти від статичного точкового оцінювання забруднення до моделювання динамічних міграційних потоків речовини в міському середовищі. Отримані кількісні закономірності розширюють уявлення про механізми міського седиментогенезу й мають практичне значення для екологічного менеджменту. *Ключові слова:* урбоекосистема, урбоґрунти, катенний підхід, важкі метали, геохімічна пастка, гранулометричний склад, зливовий стік.

Monitoring the Ecological State of Urban Soils under the Impact of Stormwater Runoff. Hurskiy I., Imamov V.

The article is devoted to a comprehensive analysis of the lateral migration, redistribution, and accumulation of ecologically hazardous pollutants (heavy metals) in the soils of Smila using a landscape-geochemical (catenary) approach. It is substantiated that the dissected microrelief of the city and the hydraulic energy of surface stormwater runoff act as powerful integrative spatial regulators that smooth out the primary mosaic pattern of anthropogenic emission from various pollutant sources. Based on the analysis of three monitoring transects (Central-Transport, Coastal-Industrial, and Mainline-Residential), a synchronous upward trend in lead and zinc accumulation from eluvial to accumulative relief positions was revealed. Comparative analysis showed that the Central-Transport transect demonstrates the highest amplitude of metal accumulation, somewhat lower but similarly high values are characteristic of the Mainline-Residential area, while the least pronounced peak is inherent to the Coastal-Industrial zone.

It was established that the maximum concentrations of toxicants are confined to local geomorphological depressions experiencing chronic stormwater flooding. The existence of a pronounced “siltation” effect in low-lying zones was proven: the content of physical clay (<0.01 mm) here increases up to 44.2–46.8%, while the fine silt fraction (<0.002 mm) increases more than twofold compared to the watersheds, reaching 18.1–19.5%. This transformation of particle-size distribution leads to an increase in soil cation exchange capacity up to 24.1–29.8 meq/100 g and the accumulation of organic matter (3.89–4.42%). Ecological risks of prolonged water stagnation were assessed, which causes oxygen deficiency and activates reduction processes, threatening the destruction of sorption complexes and the transformation of deposited heavy metals into mobile, highly toxic water-soluble forms. The proposed methodological scheme allows for a transition from static point assessment of pollution to modeling dynamic migration flows of matter in the urban environment. The obtained quantitative regularities expand the understanding of urban sedimentogenesis mechanisms and possess practical significance for environmental management. *Key words:* urban ecosystem, urban soils, catenary approach, heavy metals, geochemical trap, particle-size distribution, stormwater runoff.

© Гурський І.М., Імамов В.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Інтенсивний розвиток урбоекосистем, супроводжуваний розширенням транспортних мереж, ущільненням житлової забудови та техногенним тиском промислових зон, призводить до глибокої трансформації природних ландшафтів та формування специфічних урбанізованих екосистем [1]. Одним із найбільш вразливих компонентів міського середовища є ґрунтовий покрив, який виконує функцію довготривалого депонента антропогенних полютантів, зокрема важких металів. На відміну від атмосферного повітря чи поверхневих вод, де процеси самоочищення відбуваються відносно швидко, ґрунти акумулюють токсиканти протягом десятиліть, перетворюючись на джерела вторинного екологічного ризику для біоти та населення міст.

Сучасні дослідження міських екосистем дедалі частіше базуються на катенному підході, який дозволяє розглядати міську територію не як мозаїку ізольованих джерел емісії, а як цілісну динамічну систему з чітко вираженими векторами латеральної міграції речовини [2]. Умови сильнопересіченого рельєфу малих та середніх міст, як м. Сміла, демонструють високу залежність екологічного стану ґрунтів від мікроморфології поверхні. Поєднання значних ухилів, наявності балочних систем та глибоко врізаних річкових долин із високою часткою штучних водонепроникних поверхонь (асфальт, бетон) створює передумови для масштабного зливового змиву. Під час інтенсивних опадів поверхневий стік сортує та транспортує дрібнодисперсні фракції ґрунту й пилоподібних наносів із вищих геоморфологічних рівнів (елювіальних зон) через транзитні схили до локальних понижень та заплав (акумулятивних зон) [3], де формуються так звані «геохімічні пастки».

Актуальність дослідження. Актуальність дослідження зумовлена стрімким посиленням техногенного пресингу на міські екосистеми, де ґрунтовий покрив функціонує як головний довготривалий акумулятор екологічно небезпечних полютантів, зокрема важких металів. На відміну від атмосферного повітря чи водних об'єктів, ґрунти мають низький потенціал самоочищення, через що накопичені токсиканти (такі як свинець і цинк) перетворюються на приховані осередки хронічної екологічної небезпеки для біоти міст та здоров'я населення [4]. Традиційні моніторингові підходи часто нівелюють просторову неоднорідність міського середовища, розглядаючи забруднення як статичну мозаїку. Водночас в умовах пересіченого рельєфу малих і середніх міст, яскравим прикладом яких є місто Сміла з його глибоко врізаною долиною річки Тясмин та розгалуженими балочними системами, провідну роль у перерозподілі речовини починають відігравати латеральні міграційні процеси, що потребує впровадження системного катенного підходу. Таким чином, детальна просторова оцінка екологічного стану ґрунтового покриву м. Сміла за рельєфним градієнтом є критично необхідною для прогнозування зон довготривалого депонування токсикантів, розробки ефективних стратегій екологічного менеджменту та планування заходів із ремедіації урбанізованих ландшафтів.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлені результати дослідження є висновками із проведеної наукової роботи, що виконувалась в межах комплексних досліджень кафедри екології Уманського національного університету за темою: «Розробка методологічних підходів і практичного механізму екологічно-збалансованого природокористування», державний номер реєстрації – 0108U009772.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретико-методологічним підґрунтям для дослідження латеральної міграції речовини в геосистемах є фундаментальні концепції геохімії ландшафтів, що беруть початок від класичних праць Б. Б. Полинова та М. О. Глазовської, де катенний підхід та поняття «геохімічних пасток» визначено як базові інструменти просторового аналізу. В урбанізованому середовищі ці природні процеси зазнають глибокої техногенної трансформації. У вітчизняній науковій думці екологічний стан урбоґрунтів та трансформацію міських ландшафтів під впливом антропогенезу детально досліджували такі вчені, як О. П. Гавриленко [5] та Л.Ю. Сорокіна [7]. Водночас більшість вітчизняних публікацій фокусується на великих промислових агломераціях, тоді як специфіка просторової диференціації полютантів у межах малих і середніх міст із вираженим пересіченим рельєфом (зокрема, міст Придніпровської височини, як-от м. Сміла) все ще залишається недостатньо висвітленою.

У зарубіжній науковій спільноті ландшафтно-геохімічний аналіз урбанізованих територій розглядається як один із найбільш перспективних трендів екологічного моніторингу, що підтверджується фундаментальними роботами M. Alberti [7] та N. Grimm [8], які інтерпретують міські екосистеми як складні гібридні комплекси з інтенсивними латеральними потоками речовини. Сучасні дослідження іноземних авторів, зокрема M. Tonha [9] та S. Ramos-Romero [10], зосереджені на вивченні гранулометричного ефекту в процесах міграції токсикантів. Ними експериментально доведено, що дрібнодисперсні мулисті фракції (<0,002 мм) виступають головними носіями свинцю і цинку, концентруючись уздовж топографічного градієнта.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Недостатньо вивченими залишаються кількісні закономірності катенного перерозподілу важких металів у малих містах із сильнопересіченим рельєфом залежно від їхньої функціональної зональності. Поза увагою дослідників часто залиша-

ється ризик трансформації сорбційних комплексів в акумулятивних низинах, де тривале зливове підтоплення й дефіцит кисню можуть активувати процеси мобілізації депонованих токсикантів у рухомі, високотоксичні форми.

Новизна. Вперше на прикладі ландшафтів м. Сміла обґрунтовано роль мікроструктури рельєфу як головного просторового регулятора екологічного ризику, що нівелює мозаїчність первинної емісії полютантів. Експериментально доведено синхронність латеральної міграції Pb і Zn, яка супроводжується двократним зростанням фракції тонкого мулу та суттєвим підвищенням ємності поглинання (до 24,1–29,8 мг-екв/100 г) у нижніх ландшафтних ярусах.

Методологічне або загальнонаукове значення. Значення роботи полягає в інтеграції катенного підходу в систему моніторингу урбоекосистем, що дозволяє перейти від статичного точкового аналізу до моделювання динамічних потоків речовини. Розкриті механізми гідравлічного сортування наносів зливовим стоком розширюють теоретичні положення геохімії ландшафтів, а отримані дані слугують науковим підґрунтям для екологічного менеджменту, інженерного захисту та ремедіації міських територій.

Викладення основного матеріалу. Дослідження просторового розподілу екологічного стану ґрунтового покриву в межах урбанізованої екосистеми м. Сміла базувалося на катенному підході. Цей методологічний підхід дозволяє простежити міграцію, перерозподіл та акумуляцію екологічно небезпечних полютантів вздовж геохімічного профілю – від елювіальних ландшафтів через транселювіальні до трансакумулятивних зон, які зазнають максимального зливового навантаження.

Специфіка рельєфу м. Сміла, що характеризується пересіченістю, наявністю глибоко врізаної долини р. Тясмин, балочних систем та виражених локальних понижень, створює передумови для формування так званих «геохімічних пасток». Під час інтенсивних зливових явищ поверхневий стік з асфальтованих та бетонованих поверхонь селитебної й промислової зон акумулює значні об’єми твердих часток та розчинених сполук, які транспортуються у нижні елементи рельєфу.

Для детальної оцінки цього процесу нами було закладено три моніторингові трансекти (геохімічні катени) у різних функціональних зонах міста із чіткою географічною прив’язкою точок відбору проб за допомогою GPS-навігації (табл. 1).

Аналіз отриманих даних аналітичного контролю підтвердив гіпотезу про критичний вплив мікрорельєфу та зливового стоку на просторову диференціацію екологічного стану ґрунтів. Результати порівняльного аналізу вмісту пріоритетних токсикантів свідчать про масштабне концентрування забруднювачів у нижніх ландшафтних ярусах (рис. 1).

Таблиця 1

Географічна прив’язка та ландшафтна характеристика точок моніторингу екологічного стану ґрунтів у м. Сміла

Шифр катени	Точка відбору	Географічні координати (WGS-84)	Ландшафтно-геоморфологічна позиція	Характеристика антропогенного навантаження
Трансекта 1 (Центрально-транспортна)	Т.1-Е (елювіальна)	49°13'22.4"N, 31°52'45.1"E	Вододільне плато, вул. Незалежності	Автотранспортне навантаження помірної інтенсивності
	Т.1-ТЕ (транс-елювіальна)	49°13'35.8"N, 31°52'50.2"E	Середня частина схилу, вул. Соборна	Змив з проїжджої частини, транзитний стік
	Т.1-А (акумулятивна)	49°13'48.2"N, 31°52'58.6"E	Локальна низина біля залізничного переїзду	Зона хронічного затоплення, акумуляція зливових вод з центру
Трансекта 2 (Прибережно-промислова)	Т.2-Е (елювіальна)	49°12'10.1"N, 31°53'15.4"E	Підвищена тераса, вул. Промислова	Вплив промислових зон та приватного сектору
	Т.2-ТЕ (транс-елювіальна)	49°12'25.3"N, 31°53'30.8"E	Нижній схил корінного берега	Акумулятивно-транзитний рух поверхневих вод
	Т.2-А (акумулятивна)	49°12'38.9"N, 31°53'42.1"E	Заплавна низина р. Тясмин	Кінцева точка акумуляції талої та зливової води
Трансекта 3 (Магістрально-селитебна)	Т.3-Е (елювіальна)	49°14'05.2"N, 31°51'12.3"E	Вододіл, вул. Трипільська	Житлова забудова, приватний сектор на підвищенні
	Т.3-ТЕ (транс-елювіальна)	49°14'18.5"N, 31°51'30.0"E	Схил балки, перехрестя з інтенсивним рухом	Транзитний стік з магістралі Н-16
	Т.3-А (акумулятивна)	49°14'31.1"N, 31°51'48.4"E	Дно балочного пониження, зона накопичення наносів	Акумуляція мулу та води після злив

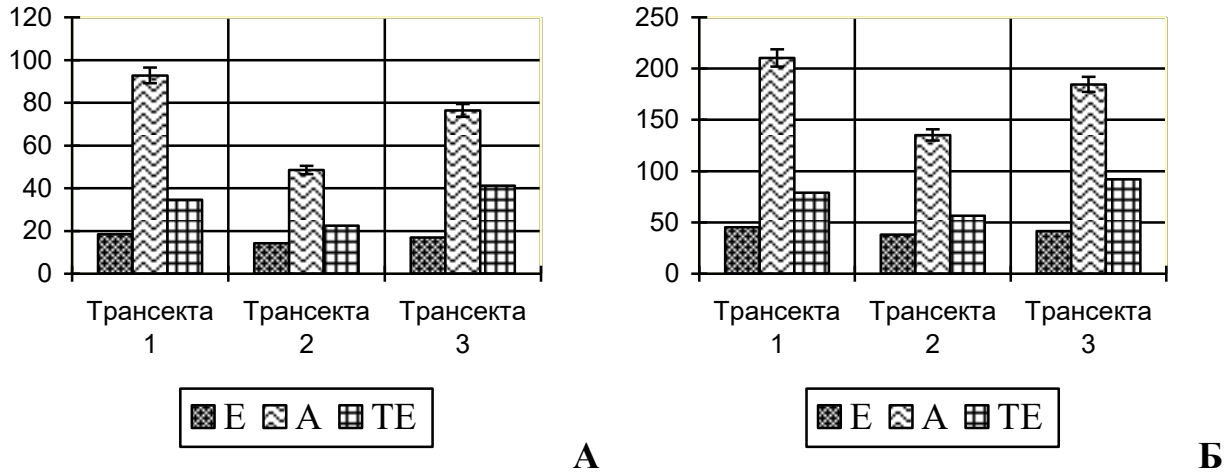


Рис. 1. Динаміка вмісту свинцю (А) та цинку (Б) в мг/кг за рельєфним градієнтом (умовні позначення: Е – елювіальна зона, А – акумулятивна зона, ТЕ – транселювіальна зона)

Аналіз отриманих графічних залежностей дозволяє виявити чітку закономірність просторового перерозподілу важких металів у системі мікроурбанізованих ландшафтів м. Сміла. Для обох досліджуваних елементів характерна ідентична за геометрією висхідна тенденція від автоморфних до акумулятивних позицій. Мінімальні значення концентрацій зафіксовані у межах вододільних плато (елювіальні фації). Це свідчить про стабільний базовий стан екотопів, які не зазнають безпосереднього гідродинамічного впливу зливових потоків.

При переході до середньої та нижньої частин схилів (транселювіальні зони) на графіках спостерігається помірне зростання кута нахилу кривих, що відгалужуються залежно від специфіки локального антропогенного навантаження. Найбільш стрімкий підйом фіксується у точках, які відповідають геохімічним депресіям рельєфу (акумулятивні зони). Цей екстремальний стрибок концентрацій наочно ілюструє роль низин як кінцевих резервуарів урбанізованого седиментогенезу. Ммаксимальні амплітуди накопичення металів демонструє Центрально-транспортна трансекта (локальне пониження біля залізничного переїзду), дещо нижчі, але аналогічно високі показники характерні для Магістрально-селитебної трансети (дно балки), а найменш виражений, хоча й висхідний пік, притаманний Прибережно-промисловій трансекті (заплава р. Тясмин).

Синхронний характер розподілу Pb та Zn на графіках доводить спільність механізмів їхнього латерального міграційного циклу в міському середовищі. Збіг точок максимального підвищення свідчить про те, що мікроструктура рельєфу та гідравлічна енергія зливового змиву виступають головними інтеграційними чинниками, які нівелюють первинну мозаїчність емісії забруднювачів від різних джерел. Графічна інтерпретація експериментальних даних беззаперечно підтверджує існування стійкого просторового вектора екологічної трансформації ґрунтів, за якого поверхневий зливовий стік перетворює локальні геоморфологічні пониження міста на зони довготривалого депонування токсикантів.

Важливим фактором, що зумовлює таку просторову диференціацію та фіксацію полютантів, є трансформація гранулометричного складу ґрунтів під впливом водної ерозії та седиментації в урбанізованому середовищі. Під час високоінтенсивних опадів відбувається гідравлічний змив дрібнодисперсних часток із вищих геоморфологічних рівнів. Водні потоки сортують тверду фазу ґрунту та пилоподібних наносів: великі піщані фракції осідають на початку схилів, тоді як найдрібніші мулисті (<0,002 мм) та глинисті (<0,01 мм) частки переносяться у зваженому стані безпосередньо в зони затоплення.

Оскільки саме мулиста фракція та тонкодисперсні колоїди володіють колосальною питомою поверхнею та високою ємністю поглинання, вони виступають основними природними сорбентами для іонів важких металів та молекул нафтопродуктів. Результати аналізу фракційного складу ґрунтів досліджуваних трансект наведено у таблиці 2.

Дані таблиці 2 чітко ілюструють ефект «замулення» акумулятивних низинних зон. Вміст фізичної глини у точках затоплення (Т.1-А, Т.3-А) зростає до 44,2–46,8%, а фракція тонкого мулу збільшується більш ніж удвічі порівняно з елювіальними плато (досягаючи 18,1–19,5%). Це свідчить про формування на дні низин вторинних техногенно-наносних горизонтів.

Така зміна гранулометричного складу кардинально змінює фізико-хімічний потенціал ґрунтів у низинах. Ємність поглинання в акумулятивних точках зростає до 24,1–29,8 мг-екв/100 г ґрунту, що суттєво перевищує показники автоморфних ділянок. З одного боку, висока сорбційна здатність та підвищений вміст органічної речовини (3,89–4,42%), яка

Таблиця 2

Гранулометричний склад та фізико-хімічні властивості ґрунтів досліджуваних трансект м. Сміла

Точка відбору проби	Вміст фракції <0,01 мм, %	Вміст фракції <0,002 мм, %	Ємність поглинання, мг-екв/100 г ґрунту	Вміст органічної речовини (гумус), %
Трансекта 1 (Центрально-транспортна)				
Т.1-Е (елювіальна)	28,4	8,2	16,5	2,81
Т.1-ТЕ (транс-елювіальна)	22,1	6,1	14,2	2,15
Т.1-А (акумулятивна)	46,8	19,5	29,8	4,42
Трансекта 2 (Прибережно-промислова)				
Т.2-Е (елювіальна)	26,2	7,9	15,8	2,65
Т.2-ТЕ (транс-елювіальна)	24,5	6,8	14,9	2,32
Т.2-А (акумулятивна)	39,4	14,2	24,1	3,89
Трансекта 3 (Магістрально-селитебна)				
Т.3-Е (елювіальна)	29,1	8,5	17,2	2,94
Т.3-ТЕ (транс-елювіальна)	21,4	5,9	13,5	1,98
Т.3-А (акумулятивна)	44,2	18,1	27,5	4,15

наноситься разом із поверхневим сміттям та листям, зв'язує токсичні елементи, переводячи їх у малорухомі форми та захищаючи на перших етапах суміжні гідросферні об'єкти.

Проте, з іншого боку, в умовах постійного зливового навантаження та тривалого застою води, в низинних ґрунтах м. Сміла створюються локальні анаеробні умови. Тимчасове перезволоження та дефіцит кисню активують процеси відновлення, що може призвести до руйнування сорбційних комплексів і трансформації міцно зв'язаних форм важких металів у мобільні, високотоксичні рухомі водорозчинні форми.

Таким чином, просторова диференціація екологічного стану ґрунтів за рельєфним градієнтом у м. Сміла підтверджує, що мікроструктура урбанізованого рельєфу виступає потужним просторовим регулятором екологічного ризику. Низинні зони міста перетворилися на стабільні осередки хронічної екологічної небезпеки через поєднання високої замуленості та екстремальних концентрацій важких металів.

Головні висновки. Застосування катенного підходу дозволило встановити, що пересічений мікрорельєф м. Сміла та гідравлічна енергія зливового стоку виступають головними регуляторами екологічного стану ґрунтів, формуючи чіткий вектор латеральної міграції та синхронного накопичення Pb і Zn від вододілів до низин. Цей процес супроводжується інтенсивним замуленням акумулятивних зон, де вміст фракції <0,002 мм зростає більш ніж удвічі (до 18,1–19,5%), що зумовлює підвищення ємності поглинання (до 24,1–29,8 мг-екв/100 г) та концентрації гумусу (до 3,89–4,42%). Попри високий первинний сорбційний потенціал таких «геохімічних пасток» (особливо у Центрально-транспортній трансекті), хронічне зливове підтоплення та дефіцит кисню активують відновлювальні процеси, які загрожують руйнуванням ґрунтових комплексів і трансформацією депонованих важких металів у мобільні, високотоксичні рухомі форми.

Перспективи використання результатів дослідження. Перспективи використання отриманих результатів полягають у їх інтеграції в систему екологічного моніторингу та містобудівного планування м. Сміла для оптимізації управління урбанізованими територіями в умовах техногенезу. Виявлені закономірності формування «геохімічних пасток» та ризики мобілізації важких металів слугуватимуть науковим підґрунтям для проектування сучасних локальних систем очищення зливового стоку, інженерного захисту низинних територій від підтоплення та диференційованого підходу до ремедіації урбоґрунтів із високим ступенем замулення.

Література

1. Cui J., Lu J., Lai Y., Wei Q., Zhao X. Spatiotemporal Dynamics and Human Health Risk Assessment of Potentially Toxic Elements in Global Urban Soils: A Systematic Meta-Analysis. *Toxics*, 2026. 14(6). P. 496.
1. https://doi.org/10.3390/toxics14060496
2. Chuanghong Su, Hongcheng Li, Shaoyang Chen, Yushu Shu, Zheyong Li, Qiang Zhang, Yong Yang, Luojing Xiang. Source-oriented landscape apportionment of heavy metals by using an integrated approach in typical mining urban agricultural soil. *Environmental Pollution*, 2025. 382. P. 126719.
3. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2025.126719

4. Bilodeau E., Martel J., Arsenault R., Brissette F. «Evaluation of the Impact of Rainfall Increases on Runoff in Urban Watersheds.» *Journal of Water Management Modeling,* 2025. 33. P. 559. https://doi.org/10.14796/JWMM.C559
5. Zandybay A., Kydyrova A., Karilkhan A., Gulnur S., Daribay A., Mkilima T. Potential impact of urbanization on heavy metals accumulation in surface soils of rapidly urbanizing cities. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2025. 11(4). P. 1547–1566. https://doi.org/10.22034/gjesm.2025.04.11
6. Гавриленко О.П. Шляхи раціоналізації регіонального природокористування в Україні: геоекологічний підхід. *Вісник Київського нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Серія: Географія*, 2011. Вип. 58. С. 20-22.
7. Сорокіна Л.Ю. Антропогенізовані ландшафти України – традиційні та поствоєнні: класифікаційні рівні, проблеми відновлення. *Ланшафтознавство*, 2022. № 2(2). С. 18–35. https://doi.org/10.31652/2786-5665-2022-2-18-35
8. Alberti M. *Advances in Urban Ecology: Integrating Humans and Ecological Processes in Urban Ecosystems*. Springer, 2008. ISBN 9780387755106.
9. Grimm N.B., Grove J.M., Pickett S.T.A., Redman C.L. Integrated Approaches to Long-Term Studies of Urban Ecological Systems. *BioScience*, 2000. Vol. 50(7). P. 571–584.
10. Tonhá M.S., Garnier J., Araújo D.F., Cunha B.C.A., Machado W. Trace metal dynamics in an industrialized Brazilian river: A combined application of Zn isotopes, geochemical partitioning, and multivariate statistics. J*ournal of Environmental Sciences*, 2021. Vol. 101. P. 313–325.
11. Ramos-Romero S.S., Benavides-Rosales H.R., Peña-Chamorro J.J. Advances in modelling the transport of heavy metals in agricultural soils and their leaching into groundwater: an integrative critical review. *Front. Environ. Sci.*, 2026. 14:1764394. https://doi.org/10.3389/fenvs.2026.1764394

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026