

ОЦІНКА ВПЛИВУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ НА ЕКОЛОГІЧНИЙ СТАН ҐРУНТІВ ПРИЛЕГЛИХ ТЕРИТОРІЙ

Єгорова О.В.¹, Чиж О.В.², Волочай П.А.¹

¹Черкаський державний технологічний університет
бул. Шевченко, 460, 18006, м. Черкаси

²Національний ботанічний сад імені М.М. Гришка Національної академії наук України
вул. Садово-Ботанічна, 1, 01014, м. Київ
ok.yehorova@chdtu.edu.ua, olyachyzh037@gmail.com

У роботі проведено оцінку рівня техногенного навантаження на ґрунтове середовище в зоні впливу залізничного транспорту на території села Березняки Черкаського району. Дослідження ґрунтів включало визначення фізико-хімічних властивостей (гранулометричного складу, кислотності, вмісту гумусу та рухомих форм фосфору) та вмісту важких металів (Cu, Zn, Pb, Cd). Встановлено закономірне зниження вмісту гумусу та рухомих форм фосфору на ділянках, розташованих на відстані 50-150 м від залізничної колії, що вказує на деградацію верхнього шару ґрунтів унаслідок інтенсивного техногенного навантаження. Поряд із цим виявлено тенденцію до лужної реакції ґрунтового середовища поблизу залізниці (рН до 8,7), що може бути спричинено накопиченням карбонатів та хімічними викидами, пов'язаними з експлуатацією залізничної інфраструктури. Вміст важких металів у ґрунтах переважно перевищував фонові рівні, що підтверджено розрахунками коефіцієнтів концентрації (K_c), сумарного індексу забруднення (Z_c) та індексу антропогенного навантаження (PLI). Особливо високі концентрації зафіксовано на відстані 200-300 м від колії, де сумарний індекс забруднення (Z_c) досягав 11,55, а індекс антропогенного навантаження (PLI) – 3,49, що свідчить про високий рівень техногенної трансформації ґрунтового покриву. Основними забруднювачами виступають цинк і свинець, коефіцієнти концентрації яких місцями перевищують фонові значення у 5-7 разів. Загальний характер змін свідчить про зниження агроecологічної якості ґрунтів, зростання екоотоксикологічного ризику та зменшення екосистемної стійкості на дослідженій території. Результати дослідження є підґрунтям для подальшого екологічного моніторингу територій, прилеглих до залізничної інфраструктури, та обґрунтування заходів із зниження техногенного навантаження, включаючи рекультивацію деградованих земель. *Ключові слова:* екологічна безпека, залізничний транспорт, важкі метали, моніторинг.

Environmental impact assessment of railway transport on the soil condition in adjacent areas. Yehorova O., Chyzh O., Volochai P.

The study assesses the level of technogenic load on the soil environment in the area influenced by railway transport within the territory of Berenziaky village, Cherkasy district. The soil research included the determination of physicochemical properties (particle-size distribution, acidity, humus content, and available phosphorus forms) as well as the concentration of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd). A consistent decrease in humus content and available phosphorus was observed in areas located 50-150 meters from the railway tracks, indicating degradation of the topsoil layer as a result of intense anthropogenic impact. In addition, a trend toward alkaline soil reaction was detected near the railway (pH up to 8,7), which may be caused by the accumulation of carbonates and chemical emissions related to railway infrastructure operation. Heavy metal content in soils mostly exceeded background levels, as confirmed by calculations of concentration coefficients (K_c), total pollution index (Z_c), and the pollution load index (PLI). Particularly high concentrations were recorded at a distance of 200-300 meters from the tracks, where the total pollution index (Z_c) reached 11,55 and the pollution load index (PLI) was 3.49, indicating a high level of technogenic transformation of the soil cover. The main pollutants are zinc and lead, whose concentration coefficients in some cases exceeded background values by 5 to 7 times. The overall pattern of changes indicates a decline in the agroecological quality of soils, an increase in ecotoxicological risk, and a reduction in ecosystem resilience in the studied area. The research results provide a foundation for further environmental monitoring of areas adjacent to railway infrastructure and for substantiating measures to reduce technogenic load, including the reclamation of degraded lands. *Key words:* environmental safety, railway transport, heavy metals, monitoring.

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсивного техногенного розвитку залізничний транспорт виступає потужним і стабільним джерелом комплексного антропогенного впливу на довкілля. Його функціонування супроводжується систематичним надходженням у навколишнє середовище забруднюючих речовин, серед яких найпоширенішими є нафта та нафтопродукти, іони важких металів, оксиди азоту, сірки, вуглецю та леткі орга-

нічні сполуки [1, 2]. Рівень екологічного навантаження може коливатися в межах від допустимого до кризового, залежно від інтенсивності експлуатації інфраструктури та її технічного стану. Основними напрямками впливу залізничного транспорту є трансформація природного ландшафту, забруднення повітря, ґрунтів, шумове та вібраційне навантаження, а також порушення структури природних екосистем [3]. Дослідження цих процесів є надзвичайно акту-

альними в контексті забезпечення екологічної безпеки та розробки ефективних заходів з мінімізації негативного впливу транспорту на навколишнє середовище.

Актуальність дослідження. Залізничний транспорт виступає одним із ключових джерел комплексного техногенного навантаження на компоненти довкілля, зокрема ґрунтово-геохімічні системи. У процесі експлуатації залізничної інфраструктури у навколишнє середовище надходить широкий спектр ксенобіотиків і токсичних речовин антропогенного походження. До найбільш поширених та екологічно небезпечних належать синтетичні поверхнево-активні речовини, вуглеводневі сполуки (включаючи нафтопродукти), феноли, сполуки важких металів та інші полутанти.

Встановлено, що найбільша концентрація забруднювальних речовин фіксується безпосередньо вздовж залізничного полотна, де систематичне накопичення токсичних сполук у ґрунтах зумовлене тривалим впливом руху поїздів, вібраційних навантажень, витоків паливно-мастильних матеріалів та атмосферного осідання шкідливих компонентів, що зумовлює деградацію ґрунтового покриву, втрату його фітоекоекологічної функції та погіршення загального стану екосистем [4].

Окрім хімічного навантаження, залізнична інфраструктура спричиняє значний вплив на рослинний покрив. Трансформація ландшафту природної екосистеми зумовлює скорочення видового різноманіття, зниження екологічної стійкості природних угруповань, а в умовах надмірного забруднення – повної деградації фітоценозів [5, 6].

Попри переважно негативний екологічний вплив залізничного транспорту на ґрунти прилеглих територій, інфраструктура залізниць може мати й несподівано позитивні функції у збереженні біорізноманіття. Залізничні насипи, завдяки своїй ізольованості, специфічному мікроклімату та низькому рівню антропогенного втручання, іноді слугують своєрідними рефугіумами – місцями збереження рідкісних та зникаючих видів. Прикладом є астрагал шерстистоквітковий (*Astragalus dasyanthus* Pall.), занесений до Червоної книги України. Цей степовий вид зберіг свої локальні популяції саме на залізничних насипах, які частково імітують природні степові екотопи, значною мірою знищені через розорювання та урбанізацію. Оцінюючи екологічний стан ґрунтів у зоні впливу залізниць, доцільно враховувати не лише рівень техногенного забруднення, а й потенціал цих територій як осередків збереження рідкісної флори.

Таким чином, вивчення просторового розподілу та рівнів забруднення ґрунтів у зонах впливу залізничного транспорту є надзвичайно актуальним, з огляду на необхідність обґрунтування природоохоронних заходів, спрямованих на мінімізацію антропогенного навантаження та збереження екологічної рівноваги в зонах транспортної інфраструктури.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Забруднення ґрунтів, повітря та рослинності у зонах залізничних колій призводить до порушення екологічної рівноваги та погіршення якості природних ресурсів, що має безпосередній негативний вплив на біорізноманіття і здоров'я населення.

На міжнародному рівні зростає увага до екологічних аспектів транспортної інфраструктури, зокрема залізничних шляхів. Європейський Союз у своїй Ґрунтовій стратегії до 2030 року наголошує на необхідності контролю забруднення ґрунтів та їх відновлення, що включає моніторинг екологічного стану територій, прилеглих до транспортних коридорів. Зокрема, рішення Ради ЄС від 17 червня 2024 року передбачає впровадження системи обов'язкового моніторингу здоров'я ґрунтів із акцентом на виявлення забруднених ділянок і розробку заходів з урахуванням соціально-економічних та екологічних чинників.

Крім того, діяльність міжнародних організацій, таких як ВООЗ, ЮНЕП та Європейська агенція з навколишнього середовища, спрямована на розробку комплексних стратегій захисту навколишнього середовища, що включають оцінку та зниження негативного впливу транспортних систем. Ці ініціативи є важливим фундаментом для формування екологічної політики на національному та регіональному рівнях.

Отже, проведене дослідження впливу залізничного транспорту на ґрунтові ресурси та прилеглих екосистем має велике значення для наукового розуміння проблеми та практичного забезпечення сталого розвитку транспортної інфраструктури з урахуванням екологічної безпеки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика екологічного впливу залізничного транспорту є одним із важливих напрямків сучасних наукових досліджень. Значну увагу цьому питанню приділяли такі вчені, як Босак П.В., Калимбет М.В., Данченко Ю.М., Бобрик Н.Ю. та інші [7-9]. У їхніх роботах розглядаються основні екологічні виклики, пов'язані з експлуатацією залізничної інфраструктури, включно з забрудненням ґрунтів, повітря та водних ресурсів, а також зміною рослинного покриву вздовж колій. Окремо висвітлюються питання методів моніторингу та оцінки екологічного стану прилеглих територій, природоохоронних заходів та управління екологічною безпекою залізничного транспорту. Наукові здобутки у цій галузі є основою для розробки ефективних стратегій мінімізації негативного антропогенного впливу, а також впровадження сталих технологій і практик в залізничній галузі.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. У численних наукових дослідженнях встановлено високий рівень техногенного

забруднення ґрунтів та інших компонентів довкілля на територіях промислових міст [10-12]. Водночас екологічний стан ґрунтового покриву в безпосередній близькості до залізничних колій залишається недостатньо вивченим, особливо на приміських і сільських територіях. Ранішні дослідження продемонстрували високий рівень накопичення важких металів та інших забруднювачів у біоіндикаторах, зокрема у дикорослих рослинах, зібраних поблизу залізничних колій у різних регіонах [12-15]. Таким чином, метою даної роботи є комплексна оцінка впливу залізничного транспорту на якісний та елементний склад ґрунтів прилеглих територій, а також аналіз просторового розподілу забруднювачів у зонах безпосереднього контакту з транспортними коліями.

Наукова новизна дослідження полягає у встановленні особливостей формування антропогенного навантаження на ґрунтовий покрив у безпосередній зоні впливу залізничних колій, зокрема у контексті акумуляції важких металів та токсичних сполук, а також у виявленні факторів, що зумовлюють інтенсивність цих процесів. Результати можуть слугувати науковим підґрунтям для розробки дієвих природоохоронних заходів та систем моніторингу екологічного стану територій, прилеглих до транспортної інфраструктури.

Методологічне або загальнонаукове значення. Отримана у ході досліджень інформація може служити орієнтиром при організації ґрунтово-екологічного моніторингу міських територій, для науково обґрунтованої оцінки геоекологічного стану урбоґрунтів і прийнятті оптимальних управлінських рішень галузі охорони навколишнього середовища.

Викладення основного матеріалу. Залізничний транспорт є одним із потужних чинників техногенного впливу на екосистеми, розташовані в безпосередній близькості до магістралей. Його експлуатація супроводжується систематичним надходженням до ґрунтового середовища токсичних речовин, зокрема важких металів та органічних сполук, що спричиняє порушення функціональних властивостей педосфери. Такий вплив зумовлює поступове зниження природної родючості ґрунтів і, за умов тривалого антропогенного навантаження, може призводити до їх деградації та втрати екосистемної стійкості.

Дослідження проводили на території с. Березняки Черкаського району Черкаської області, що розташоване у центральній частині України. У фізико-географічному відношенні досліджувана територія належить до Придніпровської височини в межах Правобережного Лісостепу. Клімат регіону – помірно континентальний із відносно теплим літом та м'якою зимою. Основним типом ґрунтового покриву є сірі лісові та чорноземні ґрунти різного ступеня опідзолення, які характеризуються середнім і високим рівнем родючості. Поблизу населеного пункту проходить залізнична гілка, що зумовлює потенційний

техногенний вплив на компоненти довкілля, зокрема на ґрунтове середовище.

З метою оцінки елементного складу ґрунтів у зоні впливу залізничного транспорту на території с. Березняки Черкаського району було обрано вісім ділянок відбору зразків. Відбір ґрунтових зразків здійснювався на різних відстанях від залізничної колії (50-500 м) з фіксованим інтервалом у 50 м, таким чином, було закладено 7 точок відбору. Такий підхід дозволив проаналізувати градієнт змін показників залежно від віддаленості джерела забруднення. Найдальша точка (500 м) розглядалася як фоновий орієнтир.

Відбір проб ґрунту здійснювали методом «конверта» у межах квадрату 1×1 м; глибина відбору становила 0-20 см, що відповідає зоні найбільшого техногенного навантаження на педосферу. Для досліджуваних зразків ґрунтів було визначено основні фізико-хімічні властивості. Вміст загального гумусу визначали методом Тюріна в модифікації ЦІНАО за ДСТУ 4289:2003. Визначення гранулометричного складу ґрунтів проводили у відповідності до ДСТУ ISO 11277:2011. Визначення кислотності ґрунту – $pH_{вод.}$ – за ДСТУ 8346:2015. Відібрані зразки аналізували за вмістом валових форм важких металів методом атомно-абсорбційної спектrophотометрії на атомному спектрометрі.

Ступінь техногенного навантаження на ґрунтовий покрив та можливість міграційного переходу до рослин визначали шляхом розрахунку основних геохімічних та екологічних показників, зокрема коефіцієнту концентрації (K_c). Даний показник характеризує ступінь накопичення важких металів у компонентах урбосистеми відносно фонового зразка та є показником активності радіальної міграції елемента:

$$K_{C_i} = \frac{C_i}{C_f}, \quad (1)$$

де C_i – концентрація i -го елемента в компонентах урбосистеми, що досліджується, C_f – фоновий вміст [14].

Оскільки антропогенне забруднення ґрунту є багатокомпонентним, коефіцієнт концентрації (K_c) не є достатньо інформативним і тому необхідні додаткові відомості про токсичну дію окремих металів та їх багатеlementних комбінацій на рослини. Тому санітарно-гігієнічну оцінку стану ґрунту проводили за сумарним показником забруднення – (Z_c), який є кумулятивною сумою вмісту елементів над їх фоновими рівнями та характеризує ефект впливу асоціації металів [14]:

$$Z_{C_i} = \sum_{i=1}^n K_{C_i} - (n-1). \quad (2)$$

Розрахунок показника накопичення забруднення (PLI – pollution load index), який демонструє, у скільки разів концентрація важких металів у ґрунті перевищує фонову проводили за формулою [14]:

$$PLI = \sqrt[n]{K_{C_1} \cdot K_{C_2} \cdot \dots \cdot K_{C_n}}, \quad (3)$$

де K_c – це співвідношення вмісту металу в зразку до фонового вмісту,

n – кількість металів.

Значення $PLI > 1$ вказує, що поверхневі відклади забруднені, $PLI < 1$ свідчить про відсутність забруднення [15].

За результатами гранулометричного аналізу ґрунтів, відібраних поблизу залізниці, встановлено значну різноманітність їхнього механічного складу (рисунок 1). Основну групу становлять різні типи суглинків (зразки 1-6), які поєднують у собі середній вміст піску, мулу та глини, що забезпечує помірну водопроникність і високу здатність акумулювати забруднювальні речовини. Окремо виділяються піщані ґрунти (зразок 7) та супіщаний (фон, зразок 8), для яких характерна висока проникність та низька ємність поглинання, що створює умови для швидкого міграційного перенесення забруднювачів у глибші горизонти. Таким чином, ґрунтовий покрив дослідженої території представлений переважно суглинками, що сприяє акумуляції важких металів та нафтопродуктів, а на ділянках із пісками і супіщаними ґрунтами існує ризик інтенсивнішого поширення забруднень у навколишнє середовище.

Аналіз вмісту гумусу в ґрунтах призалізничної зони засвідчив виражену варіабельність його показників залежно від відстані до залізничної колії (рисунок 2). Максимальне значення (4,4%) зафіксовано у зразку 8, відібраному на відстані 500 м, що слугувала фоновією ділянкою. Це вказує на високий рівень органічної речовини та відносно добру родючість ґрунту за межами безпосереднього техногенного впливу.

Підвищені концентрації гумусу також відзначено у зразках, відібраних на відстані 250 м (3,4%) та 350 м (3,5%), що відповідає середньому рівню

забезпеченості органічною речовиною. Помірні значення (2,3-2,8%) характерні для зразків, відібраних на відстані 150 м (2,8%), 200 м (2,3%) та 300 м (2,8%). Найнижчі показники виявлено у зразках на відстані 100 м (1,4%) та 50 м (0,9%), що свідчить про зниження гумусного стану ґрунтів у безпосередній близькості до залізничної колії.

У цілому спостерігається нерівномірність просторового розподілу органічної речовини, яка може бути наслідком як природних ґрунтоутворних процесів (різна гранулометрична будова, водно-повітряний режим), так і техногенного навантаження. Зокрема, на якість ґрунту можуть впливати забруднення нафтопродуктами, важкими металами, механічне ущільнення верхнього горизонту тощо. Наявність ділянок із підвищеним вмістом гумусу може вказувати на локальні умови акумуляції органічних сполук, тоді як низькі значення – на деградаційні процеси, спричинені антропогенним впливом. Таким чином, результати дослідження підтверджують мозаїчний характер гумусового стану ґрунтів поблизу залізничної інфраструктури, що необхідно враховувати під час екологічного моніторингу та планування заходів із рекультивації порушених територій.

Визначення кислотності ґрунтів у призалізничній зоні показало коливання значень рН у межах від 6,2 до 8,7, що свідчить про різний характер реакції ґрунтового середовища (рисунок 3).

Найбільш кислу реакцію (рН = 6,2) виявлено у зразку, відібраному на відстані 200 м (зразок 4), тоді як найбільш нейтральне значення зафіксовано на 350 м (зразок 7, рН = 6,9). Це може вказувати на локальні особливості ґрунтоутворних процесів або специфічний техногенний вплив на певних ділянках. У більшості зразків, особливо на ближчих відстанях до залізничної колії (50 м – зразок 1, 100 м – зразок 2, 150 м – зразок 3, 250 м – зразок 5), спостерігається

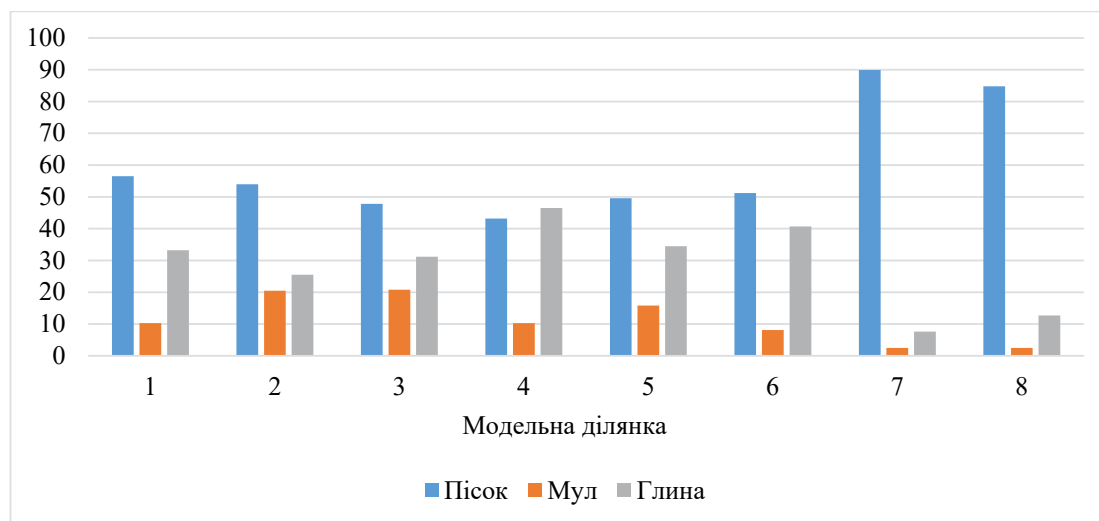


Рис. 1. Гранулометричний склад ґрунтів поблизу залізниці

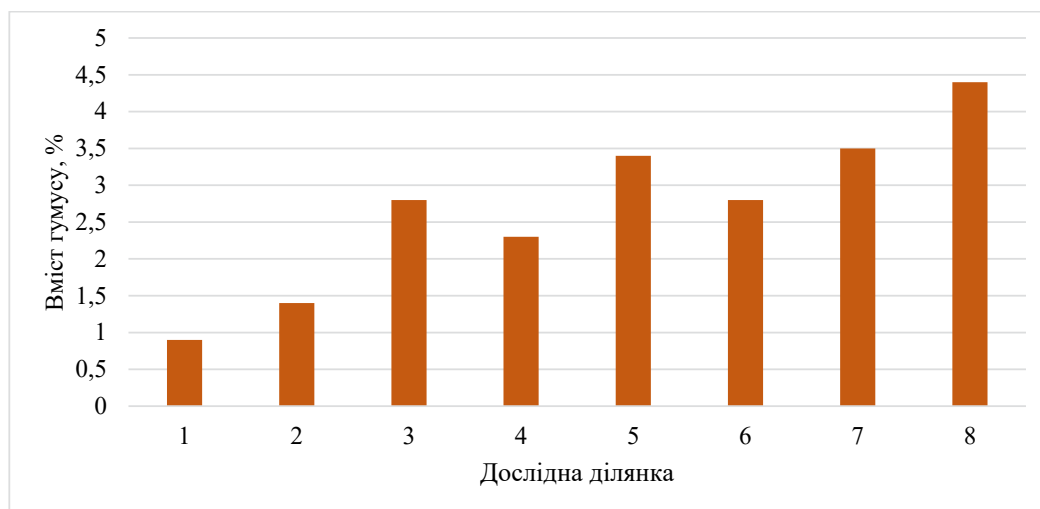


Рис. 2. Вміст гумусу у ґрунтах призалізничної зони

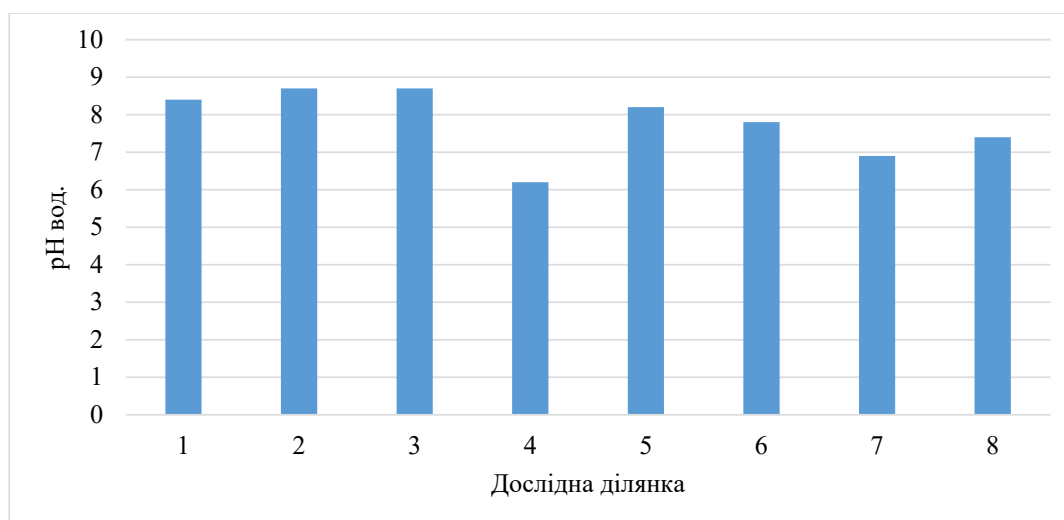


Рис. 3. Значення рН водної витяжки у ґрунтових зразках досліджуваної території

виражена лужна реакція: рН коливається в межах 8,2-8,7. У зразках, відібраних на відстані 300 м (зразок 6) та 500 м (зразок 8 – фонові ділянки), реакція ґрунту є помірно лужною – рН становить відповідно 7,4 та 7,8. Отримані результати свідчать, що досліджені ґрунти загалом мають тенденцію до лужності, що може бути пов'язано з акумуляцією карбонатів, впливом техногенного навантаження та особливостями ґрунтоутворних процесів у межах досліджуваної території. Така реакція середовища є важливим фактором, оскільки визначає доступність поживних елементів для рослин і здатність ґрунтів акумулювати або мігрувати важкі метали.

У ході дослідження було проведено визначення вмісту рухомих форм фосфору (у перерахунку на P_2O_5) (рисунк 4). Отримані результати демонструють значну варіабельність концентрацій P_2O_5 у межах досліджуваної території. Зокрема, мінімальні значення фосфатів були зафіксовані у зразках,

відібраних на відстані 50 та 100 м (9,5 та 9,1 мг/кг відповідно), що може свідчити про зниження біодоступності фосфору в зонах із підвищеним техногенним навантаженням або про деградацію ґрунту внаслідок тривалого антропогенного впливу.

Натомість найвища концентрація P_2O_5 (548 мг/кг) була виявлена на відстані 200 м, що значно перевищує типовий агрохімічний фон і вказує на потенційне локальне накопичення фосфорних сполук. Інші зразки демонструють коливання вмісту фосфатів у межах від 18,8 до 204 мг/кг, без чітко вираженої тенденції до зменшення або зростання залежно від віддаленості від залізниці. Така нерівномірність розподілу може бути обумовлена як природними чинниками – типом ґрунту, гідрологічними умовами та особливостями мікрорельєфу, – так і локальними джерелами техногенного забруднення, зокрема через витіки мастил, добрив або інших фосфоровмісних речовин, пов'язаних з обслуговуванням залізничної

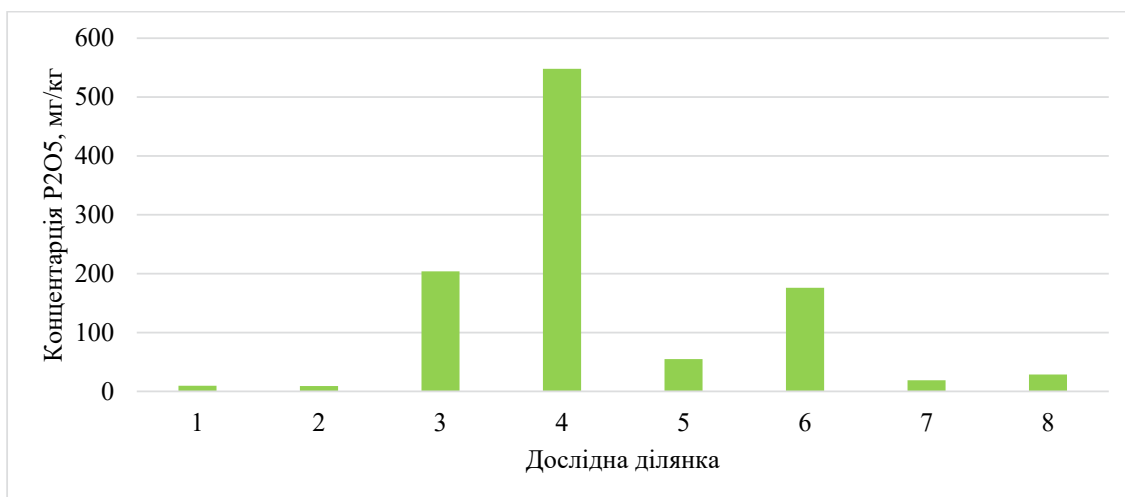


Рис. 4. Розподіл рухомих форм фосфору в ґрунтовому покриві, мг/кг

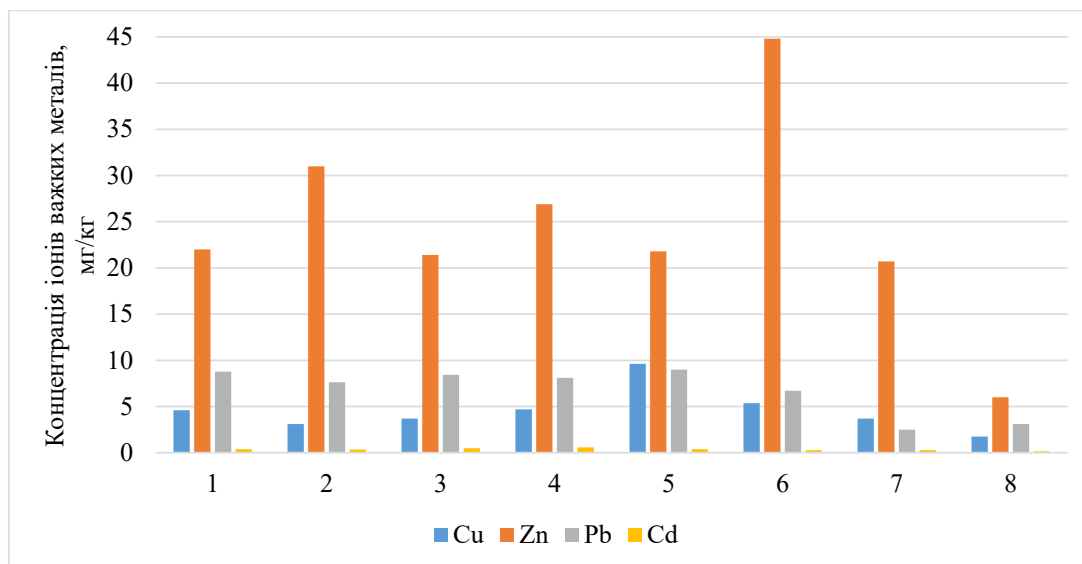


Рис. 5. Концентрації основних важких металів у зразках ґрунту, мг/кг

інфраструктури. Зазначені результати свідчать про складний характер впливу залізниці на агрохімічний стан прилеглих ґрунтів, що потребує подальших досліджень для виявлення джерел та механізмів такого забруднення.

Ґрунти, відібрані поблизу залізничної колії, показали значне накопичення важких металів, що свідчить про високий рівень техногенного забруднення (рисунк 5). Залізнична інфраструктура, зокрема рухомий склад та колійне господарство, є джерелом викидів міді, цинку, свинцю та кадмію, які надходять у навколишнє середовище в результаті зношення металевих деталей, а також викидів паливно-мастильних матеріалів.

У досліджених зразках концентрація міді варіювалася від 3,1 до 9,62 мг/кг, що у кілька разів перевищує середній фон у ґрунтоутворюючих породах України (20 мг/кг), вказуючи на значне антропогенне наван-

таження. Вміст цинку, для якого середній фон становить близько 50 мг/кг, коливався у межах 6-44,8 мг/кг, іноді перевищуючи природні значення, що також є ознакою техногенного впливу. Свинець виявлений у концентраціях від 2,5 до 9 мг/кг, що суттєво перевищує фон, що характерно для зон із активним транспортним навантаженням. Кадмій, хоч і присутній у низьких концентраціях (0,15-0,57 мг/кг), має високу міграційну активність і токсичність, а його максимальні значення наближаються до гранично допустимих рівнів для ґрунтів України.

Для оцінки ступеня забруднення були розраховані коефіцієнти концентрації (K_c), сумарний індекс забруднення (Z_c) та індекс антропогенного навантаження (PLI) (таблиця 1).

У більшості зразків спостерігається перевищення фонових значень за вмістом міді (Cu), цинку (Zn), свинцю (Pb) та кадмію (Cd), що свідчить про вплив

Таблиця 1

Оцінка рівня забруднення ґрунтів важкими металами у межах призалізничної території

№	Cu		Zn		Pb		Cd		Сумарний показник забруднення Z_c	Індекс антропогенного навантаження PLI
	C, мг/кг	K_c	C, мг/кг	K_c	C, мг/кг	K_c	C, мг/кг	K_c		
1	4,6	2.63	22,0	3.67	8,77	2.83	0,38	2.53	8,66	2,87
2	3,1	1.77	31,0	5.17	7,63	2.46	0,35	2.33	8,73	2,76
3	3,7	2.11	21,4	3.57	8,44	2.72	0,49	3.27	8,67	2,97
4	4,7	2.69	26,9	4.48	8,1	2.61	0,57	3.80	10,58	3,36
5	9,62	5.49	21,8	3.63	9,0	2.90	0,38	2.53	11,55	3,49
6	5,37	3.07	44,8	7.47	6,7	2.16	0,26	1.73	11,43	3,33
7	3,70	2.11	20,7	3.45	2,5	0.81	0,28	1.87	5,24	1,98
Ф	1,75	-	6,0	-	3,1	-	0,15	-	-	-

техногенного навантаження на якість ґрунтового покриву.

Найвищий рівень забруднення встановлено у зразку, відібраному на відстані 250 м (зразок 5), де сумарний показник забруднення Z_c становив 11,55, а індекс антропогенного навантаження (PLI) – 3,49. Значно підвищені значення цих показників також зафіксовано на 200 м (зразок 4: $Z_c = 10,58$; $PLI = 3,36$) та 300 м (зразок 6: $Z_c = 11,43$; $PLI = 3,33$), що вказує на наявність зони максимальної акумуляції забруднюючих речовин у центральній частині дослідженого профілю. Основний внесок у формування загального рівня забруднення в цих зразках забезпечують цинк та свинець, коефіцієнти концентрації яких (K_c) подекуди перевищують в 5-7 разів.

На відстанях 50-150 м (зразки 1, 2, 3) рівень забруднення залишається помірно високим (Z_c у межах 8,6-8,7; PLI 2,76-2,97), що свідчить про стабільний, але менш інтенсивний техногенний вплив у безпосередній близькості до колії, можливо, через розсіювання джерел забруднення або природні умови самоочищення ґрунтів.

Найнижчі показники сумарного забруднення ($Z_c = 5,24$) та індексу PLI (1,98) спостерігаються на відстані 350 м (зразок 7), що вказує на поступове зниження впливу техногенних чинників із віддаленням від джерела забруднення. Цей зразок є єдиним, де значення K_c свинцю (0,81) не перевищує одиниці, тобто відповідає фоновому рівню.

У цілому результати дослідження підтверджують наявність просторово мозаїчного забруднення ґрунтів призалізничної території. Сумарний індекс забруднення Z_c свідчив про помірний і сильний рівень забруднення, а індекс PLI у всіх випадках перевищував одиницю, підтверджуючи наявність техногенного впливу. Отримані дані підкреслюють необхідність постійного моніторингу та впровадження заходів щодо зменшення антропогенного

навантаження на ґрунти в районах залізничної інфраструктури, оскільки накопичення важких металів, особливо кадмію та міді, може негативно впливати на екосистеми та здоров'я людини.

Висновки. За результатами проведених досліджень встановлено, що ґрунти поблизу залізниці характеризуються значною різноманітністю гранулометричного складу з переважанням суглинків, які сприяють накопиченню забруднюючих речовин, зокрема важких металів та нафтопродуктів. Піщані та супіщані ділянки, навпаки, мають підвищену проникність, що створює умови для інтенсивнішої міграції забруднень у глибші горизонти. Вміст гумусу у досліджених ґрунтах має суттєву просторову варіабельність, що відображає поєднання природних ґрунтоутворних процесів та вплив техногенного навантаження. Підвищений рівень гумусу у деяких зразках свідчить про локальні умови акумуляції органічних речовин, тоді як низькі показники пов'язані з деградаційними процесами під впливом антропогенного фактору. Концентрації важких металів (Cu, Zn, Pb, Cd) у ґрунтах значно перевищують значення фонових рівнів, що свідчить про суттєве техногенне забруднення, пов'язане із залізничною інфраструктурою. Особливо відзначається накопичення міді та кадмію, які мають високу токсичність та потенціал міграції. Розраховані індекси забруднення (K_c , Z_c , PLI) підтверджують наявність помірного та сильного забруднення у досліджуваних ґрунтах. Отримані дані підкреслюють необхідність регулярного моніторингу якості ґрунтів у зонах впливу залізничного транспорту та впровадження заходів щодо зниження техногенного навантаження. Особливо важливо контролювати накопичення токсичних важких металів, які можуть мати довготривалі негативні наслідки для екосистем та здоров'я людини.

Література

1. Bosak P., Lukyanchuk N., Popovych V. Factors influencing railway transport on environmental safety. *Ecological Sciences*. 2022. Т. 42, № 3. С. 205–210. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.3-42.34>
2. Хатнюк Ю. А. Поняття та суть екологічної безпеки у діяльності залізничного транспорту України. *Вісник Чернівецького факультету Національного університету «Одеська юридична академія»*. 2015. № 1. С. 210–218. URL: <http://dspace.lvduvs.edu.ua/handle/1234567890/2945>
3. Пилипчук О. Я., Висоцька Т. І., Пічкур, Т. В. Вплив залізничного транспорту на навколишнє середовище: проблеми очищення ґрунту від нафтопродуктів. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2020. № 3 (30). 113–118. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.3-30.19>
4. Plakhotnik V. N., Onyshchenko J. V., Yaryshkina L. A. The environmental impacts of railway transportation in the Ukraine. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2005. Т. 10, № 3. С. 263–268. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2005.02.001>
5. Polishchuk A., Antonyak H. Influence of transport load on the elemental composition of soil in the suburban area of the city of Lviv. *Ecological Sciences*. 2021. Т. 38, № 5. С. 81–86. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2021.eco.5-38.14>
6. Vaiškūnaitė R., Jasiūnienė V. The analysis of heavy metal pollutants emitted by railway transport. *Transport*. 2020. Т. 35, № 2. С. 213–223. URL: <https://doi.org/10.3846/transport.2020.12751>
7. Danchenko Y., Bosak P., Shukel I., & Popovych V. (2023). Railway infrastructure of Ukraine as a factor of soil chemical hazard (analytical overview). // *12th International Conference “Environmental Engineering” (ICEE 2023), 11–12 May 2023, Vilnius, Lithuania*. URL: <https://doi.org/10.3846/enviro.2023.873>
8. Калимбет М. В., Зеленько Ю. В. Концепції щодо впровадження екологічно чистих та ресурсозберігаючих технологій експлуатації залізничного транспорту. Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту : матеріали 79-ї Міжнародної науково-практ. конф. (Дніпро, 16-17 травня 2019 р.) / Дніпров. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпро : Вид-во Дніпров. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2019. С. 299–301.
9. Bobryk N. Поширення та акумуляція важких металів у ґрунтах призалізничних територій. *Biosystems Diversity*. 2015. Т. 23, № 2. URL: <https://doi.org/10.15421/011526>
10. Yehorova O., Zhytska L., Bakharev V., Mislyuk O., Khomenko O. Assessing the deposition of heavy metals in edaphotopes and synanthropy vegetation under the conditions of technological pollution of the city. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. V. 1. № 10 (127). P. 15–26. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.297718>.
11. Antonyak H., Mamchur Z., Polishchuk A., Lesiv M., Hoivanovych N. Chapter 5. Environmental impact of road transport. In: *Sustainable Development and Human Health*. Edited by Andrzej Krynski, Georges Kamto Tebug, Svitlana Voloshanska. Czestochowa: Publishing House of Polonia University “Educator”, 2020. – P. 61–74. DOI: <https://dx.doi.org/10.23856/W1706>
12. Quantitative source tracking of heavy metals contained in urban road deposited sediments / N. Hong et al. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. Vol. 393. P. 122362. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122362>
13. Wang Z., Zhang J., Watanabe I. Source Apportionment and Risk Assessment of Soil Heavy Metals due to Railroad Activity Using a Positive Matrix Factorization Approach. *Sustainability*. 2022. Vol. 15, no. 1. P. 75. URL: <https://doi.org/10.3390/su15010075>
14. Гололобова О. Оцінка поліелементного забруднення ґрунтів територій різного рівня антропогенного навантаження. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2011. № 1-2. Режим доступу: <http://luddovk.univer.kharkov.ua/sites/default/files/Papers/Gololob.pdf>
15. Яковичина, Т.Ф. Індекс антропогенного навантаження на ґрунт урбоєкосистем внаслідок забруднення важкими металами. Матеріали міжнар. наук.-практ. конф. «Форум гірників – 2016», 5–8 жовтня 2016 р., Дніпро, 2, 224–229. Режим доступу: <https://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/149875/1/224-229.pdf>

Дата першого надходження рукопису до видання: 13.10.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 21.11.2025

Дата публікації: 15.12.2025