

УДК 504.53:546.3:656.2

<https://doi.org/10.31073/ecobezpeka202406/1-08>

ГЕОХІМІЧНА ОЦІНКА ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТІВ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ В ЗОНІ ВПЛИВУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Коцюбинський А. О., Линник Д. О., Марич Т. М.,
Грицуляк Г. М. Довгалюк О. В. Медвідь М. М.
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Забруднення ґрунтів важкими металами становить серйозну загрозу для здоров'я населення, оскільки ці елементи здатні мігрувати по ґрунтовому профілю, потрапляти до підземних вод та включатися в харчові ланцюги через рослинність. У статті представлено результати геохімічної оцінки забруднення ґрунтів важкими металами в зоні впливу залізничного транспорту. Актуальність дослідження зумовлена зростанням техногенного навантаження на придорожні території залізничної інфраструктури та ризиками накопичення токсичних елементів у ґрунтовому покриві. Метою роботи є визначення рівня та характеру просторового розподілу важких металів у ґрунтах, прилеглих до залізничної колії. Дослідження проведено шляхом градієнтного відбору ґрунтових проб на різних відстанях від колії з подальшим визначенням елементного складу методом рентгенофлуоресцентної

спектрометрії. У зразках встановлено присутність широкого спектра макро- та мікроелементів, зокрема техногенно зумовлене збагачення цинком, міддю, нікелем, хромом та залізом. Для більшості досліджених металів виявлено чітку тенденцію зниження концентрацій зі збільшенням відстані від джерела впливу, що підтверджує роль залізничного транспорту як локального чинника формування геохімічних аномалій. Отримані результати свідчать про необхідність систематичного екологічного моніторингу ґрунтів у придорожній смузі залізниць, особливо в межах сільськогосподарських та селітебних територій, з метою мінімізації екологічних ризиків та запобігання вторинному забрудненню компонентів довкілля.

Ключові слова: забруднення ґрунтів, важкі метали, залізничний транспорт, колія, рентгенофлуоресцентний аналіз.

GEOCHEMICAL ASSESSMENT OF SOIL CONTAMINATION WITH HEAVY METALS IN THE AREA AFFECTED BY RAILWAY TRANSPORT

Kotsyubynsky A. O., Lynnyk D. O., Marych T. M., Hrytsulyak G. M., Dovgalyuk O. V., Medvid M. M.

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Soil contamination with heavy metals poses a serious threat to public health, as these elements can migrate through the soil profile, enter groundwater,

and enter the food chain through vegetation. This article presents the results of a geochemical assessment of heavy metal contamination in soils in areas affected by

rail transport. The relevance of this study is due to the increasing anthropogenic load on roadside areas of railway infrastructure and the risks of toxic elements accumulating in the soil cover. The aim of the work is to determine the level and nature of the spatial distribution of heavy metals in soils adjacent to the railway track. The study was conducted by gradient sampling of soil samples at different distances from the track, followed by determination of the elemental composition by X-ray fluorescence spectrometry. The samples showed the presence of a wide range of macro- and microelements, in particular, technogenic enrichment with zinc, copper, nickel, chromium, and iron. For most of the metals studied, a clear trend of decreasing concentrations with increasing distance from the source of influence was found, confirming the role of rail transport as a local factor in the formation of geochemical anomalies. The results obtained indicate the need for systematic environmental monitoring of soils in the roadside strip of railways, especially within agricultural and residential areas, in order to minimize environmental risks and prevent secondary pollution of environmental components.

Keywords: soil pollution, heavy metals, rail transport, track, X-ray fluorescence analysis.

Постановка проблеми.

Транспортна інфраструктура є одним із найбільш значущих антропогенних чинників впливу на довкілля, особливо в урбанізованих регіонах. Залізничний транспорт, незважаючи на свою екологічну перевагу порівняно з автомобільним, створює локальні зони техногенного навантаження вздовж транспортних коридорів. Інтенсивна експлуатація залізниць супроводжується надходженням у навколишнє середовище широкого спектру забруднювальних речовин, серед яких особливу небезпеку становлять важкі метали через їх токсичність, здатність до акумуляції в ґрунтах та міграцію у інші компоненти навколишнього

середовища. Основними джерелами надходження важких металів у придорожню смугу залізниць є абразивне зношування рейок і колісних пар рухомого складу, корозія металевих конструкцій, викиди від дизельних локомотивів, витікання паливно-мастильних матеріалів, застосування гербіцидів для обробки колійного полотна та осідання аерозольних часток від транспортованих вантажів. Унаслідок цих процесів у ґрунтах прилеглих територій накопичуються такі елементи як залізо, мідь, цинк, свинець, хром, нікель та кадмій. Просторовий розподіл цих металів формується під впливом інтенсивності залізничного руху, метеорологічних умов, особливостей рельєфу та фізико-хімічних властивостей самих ґрунтів. Забруднення ґрунтів важкими металами становить серйозну екологічну загрозу, оскільки ці елементи здатні мігрувати по ґрунтовому профілю, потрапляти до підземних вод та включатися в харчові ланцюги через рослинність. Особливу занепокоєність викликає той факт, що залізничні колії часто проходять через сільськогосподарські угіддя та селітебні зони, де ризики для здоров'я населення є найбільш критичними. Тому геохімічна оцінка стану ґрунтів у зоні впливу залізничної інфраструктури є актуальним завданням екологічного моніторингу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Функціонування залізничної інфраструктури супроводжується комплексним техногенним впливом на навколишнє середовище. Забруднення ґрунтового покриву відбувається внаслідок надходження важких металів та ароматичних вуглеводнів, які через інфільтраційні процеси та латеральну міграцію можуть досягати водоносних горизонтів і поверхневих водних об'єктів [1,3]. Паливно-мастильні матеріали, зокрема бензин, дизельне паливо та мастильні речовини, характеризуються

високою токсичністю та канцерогенним потенціалом для біоти [2]. Останніми роками спостерігається підвищення ризику забруднення важких металів, пов'язаної з експлуатацією залізничного транспорту. Основна частина викидів забруднювальних речовин від процесів горіння зумовлена використанням палива в двигунах внутрішнього згоряння тягового рухомого складу. До пріоритетних поллютантів, що надходять у навколишнє середовище, належать тверді частинки, леткі неметанові органічні сполуки, діоксид сірки та оксиди азоту. Проте значну небезпеку становлять також процеси абразивного зношування металевих елементів залізничної інфраструктури. Внаслідок тертя між рейками та колесами рухомого складу важкі метали у вигляді аерозолів потрапляють в атмосферу, ґрунт, поверхневі та підземні води, створюючи локальні зони підвищеного забруднення. Підвищені концентрації важких металів також фіксуються поблизу місць зберігання дерев'яних шпал, просочених креозотом. Свинець, кадмій та цинк визнано найбільш токсичними та поширеними елементами-забруднювачами залізничних територій [4].

Викиди твердих частинок, асоційовані зі зносом рейок, коліс транспортних засобів, гальмівних колодок та дисків, струмоприймачів пантографів та контактних ліній на електрифікованих лініях, а також вихлопні гази на неелектрифікованих ділянках, становлять основні джерела забруднення залізничних територій [7]. Корозійні процеси металевих конструкцій, включаючи мости та тунелі, також вносять вклад у забруднення важкими металами, зокрема свинцем, кадмієм та нікелем, які здатні акумулюватися в ґрунтах та водних об'єктах, створюючи ризики для здоров'я людини та функціонування екосистем [8].

Процес зношування рейок відбувається переважно вздовж вертикальної площини через передачу високих навантажень. На криволінійних ділянках колії виникає додаткове тертя між гребенем колеса та бічною поверхнею головки рейки, що спричиняє посилений латеральний знос, пропорційний до кривизни траси. Відповідно найінтенсивніше забруднення важкими металами внаслідок зношування рейок буде спостерігатися на найбільш викривлений ділянках колії. Для мінімізації зношування на криволінійних ділянках застосовуються спеціальні сплави рейкової сталі. Підвищений вміст хрому та міді в придорожніх ґрунтах може бути індикатором інтенсивного зносу залізничних рейок та транспортних коліс [7].

Результати досліджень свідчать про помірний або сильний рівень забруднення ґрунтів пріоритетними токсичними елементами в зоні впливу залізничного транспорту. Встановлено, що залізничний транспорт є основним джерелом міді, нікелю та цинку, концентрації яких значно зменшуються нелінійно з відстанню від колії. Згідно дослідження [5], емісія міді, нікелю та цинку істотно знижується на відстані від колії, що пояснюється їх походженням від абразивного стирання компонентів залізничної інфраструктури. Залізничний транспорт встановлено як джерело забруднення ґрунтів оловом та сурмою, збагачення якими відбувається внаслідок стирання гальмівних систем, рейок, коліс, втрат вантажів та вихлопних газів. Статистичний аналіз експериментальних даних показує [6], що розподіл сурми та олова у ґрунтах поблизу залізничних колій визначається функціональним призначенням території, відстанню від колії, топографічними особливостями, віком залізничної інфраструктури, а також властивостями ґрунтів, включаючи

гранулометричний склад, вміст гумусу та рН. Характерною особливістю забруднення є максимальні концентрації у ґрунтах поблизу великих вузлових залізничних станцій, зменшення концентрацій з відстанню від залізниці, зростання з тривалістю експлуатації інфраструктури, а також вплив топографічних умов на просторовий розподіл [6].

Забруднення ґрунтів важкими металами становить серйозну загрозу для рослинного покриву, здоров'я людини та глобальної продовольчої безпеки. Рухомі форми кадмію чинять негативний вплив на життєдіяльність ґрунтових мікроорганізмів та адсорбцію органічної речовини. Високі концентрації свинцю спричиняють зміни рН ґрунтового розчину та сорбційної здатності ґрунтів. Мідь проявляє токсичний ефект щодо специфічних мікробних угруповань, особливо бактерій порядку Rhizobiales. Цинк викликає пригнічення активності біологічно важливих мікроорганізмів та бактеріальної мікрофлори [11]. Важкі метали знижують активність ґрунтових ферментів пропорційно до ступеня забруднення, що впливає на процеси мінералізації органічної речовини та вивільнення біогенних елементів (вуглецю, азоту, фосфору, сірки), призводячи до трансформації структури мікробного ценозу ґрунту [12]. Поступова міграція забруднювачів углиб ґрунтового профілю призводить до контамінації підземних вод з наступним потраплянням до поверхневих водних об'єктів. Акумуляція важких металів в організмі відбувається протягом тривалого періоду, спричиняючи різноманітні патологічні зміни. У рослин це призводить до пошкодження кореневої системи та асиміляційного апарату, порушення клітинних структур та життєво важливих біохімічних процесів, зокрема фотосинтезу та мінерального живлення [10]. Для людини важкі метали становлять загрозу

ураження критичних органів – нирок та печінки, а також розвитку онкологічних захворювань. Ступінь шкідливості цих елементів визначається їх концентрацією, тривалістю експозиції та дозою. Миш'як, хром, кадмій та свинець належать до найнебезпечніших металів, здатних індукувати мутагенні, канцерогенні ефекти та пошкодження генетичного матеріалу [9].

Визначення цілей статті (постановка завдання). Мета роботи: геохімічна оцінка забруднення ґрунтів важкими металами в зоні впливу залізничного транспорту.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

- 1) Провести відбір ґрунтових проб на різних відстанях від залізничної колії ;
- 2) Визначити елементний склад досліджуваних ґрунтових зразків;
- 3) Проаналізувати закономірності просторового розподілу важких металів;
- 4) Оцінити ступінь техногенної трансформації ґрунтового покриву придорожніх територій залізниці.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Дослідження просторового розподілу забруднювачів проводили шляхом відбору ґрунтових проб на трьох відстанях від залізничної колії: безпосередньо біля колії (зразок 1), на відстані 2 м (зразок 2) та 3 м (зразок 3). Відібрані проби висушували до повітряно-сухого стану, подрібнювали та гомогенізували для забезпечення репрезентативності аналізу. Геохімічну оцінку елементного складу ґрунтів здійснювали методом рентгенофлуоресцентної спектрометрії.

Рентгенофлуоресцентний аналіз трьох ґрунтових зразків, відібраних на різних відстанях від залізничної колії, виявив присутність численних хімічних елементів з широким діапазоном концентрацій від макро- до мікрорівня.

Таблиця 1

Елементний склад ґрунту

Елемент	Концентрація мг/кг		
	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3
80	46.647	46.777	48.822
12Mg	3.452	1.616	1.901
13Al	3.129	2.908	4.152
14Si	30.799	31.964	35.470
15P	0.205	0.138	0.142
16S	0.354	0.233	0.110
19K	4.386	3.993	4.564
20Ca	1.503	1.594	1.365
22Ti	0.535	0.492	0.618
23V	–	ppm 127	–
24Cr	ppm 153	ppm 144	ppm 92
25Mn	0.149	0.165	0.087
26Fe	8.637	9.842	2.665
28Ni	ppm 84	ppm 67	ppm 33
29Cu	ppm 212	ppm 169	ppm 33
30Zn	ppm 760	ppm 610	ppm 149
31Ga	ppm 19	ppm 18	ppm 17
33As	ppm 30	ppm 19	–
37Rb	ppm 64	ppm 77	ppm 65
38Sr	ppm 143	ppm 158	ppm 108
39Y	ppm 39	ppm 21	ppm 24
40Zr	ppm 341	ppm 233	ppm 449
41Nb	–	–	ppm 38
42Mo	–	ppm 22	–
56Ba	–	ppm 610	–
82Pb	ppm 205	ppm 23	ppm 66

*Джерело: розроблено авторами

Серед макроелементів домінуючою складовою у всіх досліджуваних зразках виявився бром, що може свідчити про присутність органічних бромвмісних сполук. Кремній, як основний породоутворюючий елемент, становив значну частку від загальної маси проб. Концентрації калію, алюмінію, кальцію, магнію та титану були відносно стабільними у всіх зразках. Розподіл заліза свідчить про техногенне забруднення ґрунтів внаслідок абразивного зношування рейок та колісних пар рухомого складу.

Марганець, який часто корелює із залізом у техногенних ґрунтах, також демонстрував зростання концентрації у відповідних зразках. З мікроелементів високі концентрації виявлено для цирконію, стронцію та рубідію. Барій у значній кількості зафіксовано лише у другому зразку. Миш'як виявлено у другому та третьому зразках, тоді як у першому його вміст був нижче межі виявлення. Ванадій та молибден зареєстровано виключно у другому зразку, що може вказувати на локальну неоднорідність забруднення.

На рисунку 1 відображено порівняльний розподіл концентрації важких металів у ґрунтових зразках.

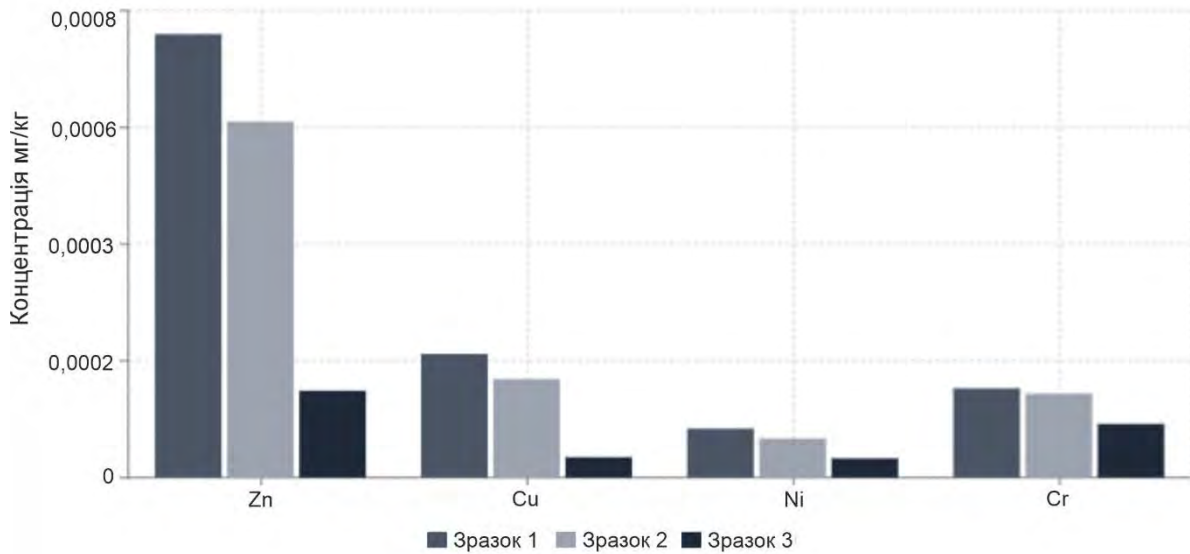


Рисунок 1. – Порівняльний розподіл концентрації важких металів у ґрунтових зразках
*Джерело: розроблено авторами

Цинк демонструє найвищі концентрації серед усіх досліджених металів, при цьому спостерігається чітка закономірність зниження його вмісту при збільшенні відстані від колії. Ґрунт, відібраний у безпосередній близькості від залізниці, характеризується максимальними концентраціями цинку, тоді як найвіддаленіший зразок виявляє мінімальні значення. Мідь посідає друге місце за концентраціями і демонструє аналогічну тенденцію просторового розподілу, з найвищими показниками в приколійній зоні та поступовим зниженням при віддаленні. Нікель та хром присутні у нижчих концентраціях порівняно з цинком та міддю, проте зберігають той самий характер розподілу залежно від відстані до колії. Для всіх чотирьох досліджених металів простежується послідовне зниження концентрацій при збільшенні відстані

від залізничної інфраструктури, що свідчить про те, що залізнична колія та пов'язана з нею діяльність є основним джерелом надходження цих забруднювачів у ґрунт. Свинець також досягає максимальної концентрації у найближчій до колії точці відбору, проте не демонструє лінійного зниження концентрації з віддаленням від колії. Найбільш інтенсивне забруднення цинком та міддю в приколійній зоні може бути зумовлене продуктами зносу рухомого складу, цинкуванням металевих конструкцій колії, а також осадженням промислових викидів від локомотивів. Виражений градієнт концентрацій чітко демонструє міграцію забруднювачів від залізничної колії у навколишні ґрунти. На рисунку 2 відображено градієнт залежності концентрації важких металів від відстані до колії.

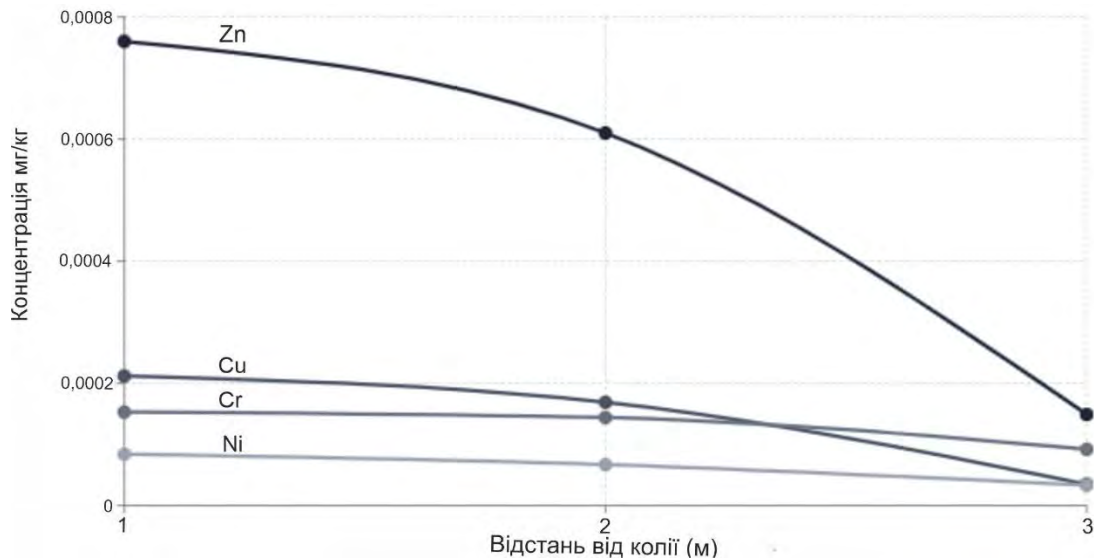


Рисунок 2. – Залежність концентрації від відстані до колії

*Джерело: розроблено авторами

Графік відображає залежність концентрацій важких металів (від відстані до залізничної колії в трьох точках відбору. Усі чотири метали - цинк, мідь, хром та нікель - демонструють закономірне зниження концентрацій при збільшенні відстані від колії, проте характер цього зниження суттєво відрізняється. Найбільш виражений градієнт спостерігається для цинку, який показує різке, майже п'ятикратне падіння концентрації від першого до третього метра, тоді як мідь, хром та нікель характеризуються більш плавним, поступовим зниженням. Така аномально висока швидкість зменшення концентрації цинку може бути зумовлена специфікою його міграції у ґрунтовому середовищі: цинк характеризується високою мобільністю та розчинністю, особливо у формі іонів та комплексних сполук, що забезпечує його швидке вимивання атмосферними опадами та транспортування на значні відстані. Крім того, джерело цинкового забруднення, ймовірно пов'язане з цинкуванням металоконструкцій або гальванічними процесами, розташоване безпосередньо біля колії, що створює локальний піковий викид у точці один метр, після чого відбувається стрімке розведення забруднювача. На відміну від цинку, мідь, хром та нікель мають

меншу мобільність через їх здатність до сорбції на органічній речовині ґрунту та глинистих мінералах, що забезпечує більш рівномірний просторовий розподіл та менш різкий градієнт концентрацій.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У результаті проведених досліджень геохімічного стану ґрунтів у зоні впливу залізничного транспорту методом рентгенофлуоресцентної спектроскопії визначено елементний склад ґрунтових проб, відібраних на градієнтних відстанях від колії. Встановлено присутність 26 хімічних елементів у досліджуваних зразках, серед яких виявлено значне техногенне збагачення залізом, цинком, міддю, нікелем та хромом. Цинк та мідь демонструють найвищі концентрації серед усіх досліджених важких металів, досягаючи максимальних значень у безпосередній близькості від залізничної колії. Нікель та хром присутні у нижчих концентраціях порівняно з цинком та міддю, проте зберігають аналогічний характер просторового розподілу з послідовним зниженням при віддаленні від колії. Для свинцю встановлено нелінійний характер розподілу, що може вказувати на наявність додаткових локальних джерел забруднення.

Результати дослідження підтверджують високий ступінь техногенної трансформації ґрунтового покриву придорожніх територій залізниці та формування локальних геохімічних аномалій у приколіній смузі. Встановлені закономірності просторової міграції забруднювачів від залізничної колії у навколишні ґрунти обґрунтовують необхідність систематичного екологічного моніторингу придорожніх територій залізничної інфраструктури, особливо в зонах проходження колій через сільськогосподарські угіддя та селітебні території, де ризики для здоров'я населення є найбільш критичними.

Список літератури

1. Devatha, C. P., Vishnu Vishal, A., & Purna Chandra Rao, J. (2019). Investigation of physical and chemical characteristics on soil due to crude oil contamination and its remediation. *Applied Water Science*, 9, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s13201-019-0970-4>
2. Kuppusamy, S., Maddela, N. R., ... & Venkateswarlu, K. (2020). Ecological impacts of total petroleum hydrocarbons. Total petroleum hydrocarbons: Environmental fate, toxicity, and remediation, 95-138.
3. Broomandi, P., Guney, M., Kim, J. R., & Karaca, F. (2020). Soil contamination in areas impacted by military activities: a critical review. *Sustainability*, 12(21), 9002.
4. Vaiškūnaitė, R., & Jasiūnienė, V. (2020). The analysis of heavy metal pollutants emitted by railway transport. *Transport*, 35(2), 213-223. <https://doi.org/10.3846/transport.2020.12751>
5. Brtnický, M., Pecina, V., Juříčka, D., Kowal, P., Galiová, M. V., Baltazár, T., & Radziemska, M. (2022). Can rail transport-related contamination affect railway vegetation? A case study of a busy railway corridor in Poland. *Chemosphere*, 293, 133521. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133521>
6. Stančić, Z., Fiket, Ž., & Vuger, A. (2022). Tin and antimony as soil pollutants along railway lines—a case study from North-Western Croatia. *Environments*, 9(1), 10. <https://doi.org/10.3390/environments901010>
7. Szmagliński, J., Nawrot, N., Pazdro, K., Walkusz-Miotk, J., & Wojciechowska, E. (2021). The fate and contamination of trace metals in soils exposed to a railroad used by Diesel Multiple Units: Assessment of the railroad contribution with multi-tool source tracking. *Science of the Total Environment*, 798, 149300. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149300>
8. Stojić, N., Štrbac, S., Čurčić, L., Pucarević, M., Prokić, D., Stepanov, J., & Stojić, G. (2023). Exploring the impact of transportation on heavy metal pollution: A comparative study of trains and cars. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 125, 103966. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103966>
9. Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi, M. (2021). Toxic mechanisms of five heavy metals: mercury, lead, chromium, cadmium, and arsenic. *Frontiers in pharmacology*, 12, 643972.
10. Rehman, A. U., Nazir, S., Irshad, R., Tahir, K., ur Rehman, K., Islam, R. U., & Wahab, Z. (2021). Toxicity of heavy metals in plants and animals and their uptake by magnetic iron oxide nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, 321, 114455.
11. Botirov, M. T., Normatova, S. A., Nizametdinova, M., Shodmonov, U., & Mamarasulov, J. (2021). Influence of oil and oil products on living organisms and methods of soil purification from oil products. *Asian Journal of Advances in Research*, 186-190.

12. Alengebawy, A., Abdelkhalek, S. T., Qureshi, S. R., & Wang, M.-Q. (2021). Heavy Metals and Pesticides Toxicity in Agricultural Soil and Plants: Ecological Risks and Human Health Implications. *Toxics*, 9(3), 42. <https://doi.org/10.3390/toxics9030042>
-
-