



УДК 556.532 (477-924-52)

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.7.2024.3>

ЕКОЛОГО-ТОКСИКОЛОГІЧНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ҐРУНТІВ ТЕРИТОРІЇ ХАРКІВСЬКОГО РАЙОНУ ХАРКІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

О. М. Крайнюков¹, І. А. Кривицька², О. Є. Найдюнова³

Моніторингові дослідження території, забруднених вибухівкою та похідними бойових дій, зараз є обов'язковим елементом стратегії повернення України до нормального існування, а також значні зусилля повинні бути вкладені в пошук економічних технологій відновлення. В статті розглядаються питання біологічного моніторингу та очищення, оскільки воно, як правило, є найменш дорогим засобом знешкодження забруднюючих речовин. В лабораторії еколого-токсикологічних досліджень ННІ екології Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна було проведено серію експериментів по визначенню фітотоксичного впливу ґрунтів з 5 моніторингових площадок на ріст коренів та паростків тест-рослин овес *Avena sativa* L. Відбір зразків ґрунтів з моніторингових площадок було проведено у травні та серпні 2023 року. За результатами проведених експериментальних досліджень було отримано наступні результати: у травні 2023 року найбільш виражені фітотоксичні властивості ґрунтів були визначені у с. Слобожанське та с. Борщова, де рівень забрудненості ґрунтів дорівнював IV класу якості – ґрунти брудні. На інших моніторингових площадках фітотоксичні властивості ґрунтів відповідали II та III класу забрудненості. У серпні спостерігалась тенденція до зниження фітотоксичних властивостей ґрунтів. На трьох моніторингових площадках: с. Слобожанське, с. Борщова та с. Руські Тишки – рівень забрудненості ґрунтів відповідав III класу (ґрунти помірно забруднені), а двох інших площадках (с. Черкаські Тишки та Циркуні) дорівнював II класу (ґрунти слабо забруднені). Проведення моніторингових спостережень одразу після закінчення активних бойових дій може надати змогу визначити рівень забрудненості ґрунтового покриву та надати можливість оцінити шкоду (збиток), який було спричинено довкіллю.

Ключові слова: забруднення, важкі метали, ґрунти, тест-об'єкт, фітотоксичні властивості, біотестування, фіторемедіація.

¹ доктор географічних наук, професор,
професор кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти
(Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: alkraynukov@gmail.com
ORCID: 0000-0002-5264-3118

² кандидат біологічних наук,
доцент кафедри екологічної безпеки та екологічної освіти
(Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, м. Харків)
e-mail: ivkrivicka@gmail.com
ORCID: 0000-0003-4727-794X

³ кандидат біологічних наук, старший науковий співробітник,
в.о. завідувача сектору мікробіології ґрунтів
(Національний науковий центр «Інститут ґрунтознавства та агрохімії
імені О. Н. Соколовського», м. Харків)
e-mail: naydyonova@ukr.net
ORCID: 0000-0002-8568-5699

ECOLOGICAL AND TOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF SOIL QUALITY OF THE TERRITORY OF KHARKIV DISTRICT KHARKIV OBLAST

O. M. Krainiukov, I. A. Kryvytska, O. E. Naidonova

*Monitoring studies of areas contaminated by explosives and derivatives of hostilities are now a mandatory element of the strategy of returning Ukraine to normal existence, and significant efforts must be invested in the search for economic recovery technologies. The article deals with the issue of biological monitoring and treatment, since it is, as a rule, the least expensive means of neutralizing pollutants. A series of experiments was conducted to determine the phytotoxic effect of soils from 5 monitoring sites on the growth of roots and sprouts of the test plants oat *Avena sativa* L. The selection of soil samples from the monitoring sites was held in May and August 2023. According to the results of experimental studies, the following results were obtained: in May 2023, the most pronounced phytotoxic properties of soils were determined in the village of Slobozhanske and Borschova, where the level of soil pollution was equal to the IV quality class – the soil is dirty. At other monitoring sites, the phytotoxic properties of soils corresponded to II and III pollution classes. In August, a tendency to decrease phytotoxic properties of soils was observed. At three monitoring sites: Slobozhanske, village Borshcheva and S. Ruski Tyshki – the level of soil pollution corresponded to class III (soils are moderately polluted), and at the other two sites (Cherkaski Tyshki and Tsyrkuny villages) it was equal to class II (soils are slightly polluted). Conducting monitoring observations immediately after the end of active hostilities can provide an opportunity to determine the level of contamination of the ground cover and provide an opportunity to assess the damage (damage) that has been caused to the environment.*

Key words: pollution, heavy metals, soils, test object, phytotoxic properties, biotesting, phytoremediation.

Вступ

Вторгнення російських загарбників, що триває, є найпомітнішим конфліктом у Європі після Другої світової війни та має кілька геополітичних, економічних, інфраструктурних наслідків та наслідків для здоров'я населення України. На якість повітря негативно впливає пересування військ і постійні бомбардування. Фізичні, хімічні та біологічні характеристики ґрунту постраждали через обстріли та вибухи, внаслідок чого серйозно постраждало сільське господарство.

Один із найнебезпечніших засобів впливу людини на властивості ґрунту – це військова діяльність (Nomma-Takeda et al., 2002). Порушення ґрунту, спричинені бойовими діями, в основному бувають трьох типів – фізичні, хімічні та біологічні. Фізичні порушення ґрунту включають ущільнення внаслідок будівництва оборонної інфраструктури, риття траншей або тунелів, ущільнення через рух техніки та військ або утворення кратерів бомбами. Хімічні порушення складаються з надходження забруднюючих речовин, таких як нафта, важкі метали, нітроароматичні вибухові речовини, фосфорорганічні нервово-паралітичні речовини, діоксини та радіоактивні елементи. Біологічні порушення виникають в результаті руйнування складних біоценозів, які забезпечують сталість ґрунтового покриву. Хімічний склад ґрунту, а також

його морфологічні та біологічні особливості можуть бути суттєво змінені під час бойових дій як у воєнний, так і в мирний час (наприклад, на випробувальних об'єктах), і для повного відновлення деяких характеристик можуть знадобитися роки чи навіть століття. Деякі функції ґрунту можуть бути остаточно втрачені, якщо не застосовувати відповідні методи рекультивациі. Такі методи часто є надзвичайно дорогими, як у випадку забруднення діоксинами чи радіонуклідами, а рекультивациа може навіть призвести до повного видалення забрудненого ґрунту та його заміни ґрунтовым матеріалом з іншого місця (Pereira et al., 2022).

Ґрунт можна визначити як динамічну суміш частинок гірських порід, органічної речовини, повітря та води, і це фундаментальний компонент екосистеми та важливий ресурс для діяльності людини. Він виконує різні основні функції для підтримки життя на планеті – забезпечує водою та поживними речовинами рослини та сільськогосподарські культури та впливає на кругообіг речовин, що потрапляють у навколишнє середовище (зберігання, фільтрація та буферизациа). Ґрунт є невідновлюваним ресурсом, і потреба запобігати його деградації стає дедалі гострішою з кожним днем. Європейська комісія включила охорону ґрунтів до числа пріоритетів 6-ї Програми дій з охорони навколишнього середовища, розробивши тематичну стратегію ґрунту

(STS) у 2002 році (Комісія ..., 2002) та пропозицію щодо основи захисту ґрунту в 2006 (Комісія ..., 2006).

Потенційний вплив забруднюючих речовин на здоров'я людини та навколишнє середовище оцінюється за допомогою оцінки ризику на основі хімічних речовин або біологічних підходів. Ці різні методи часто застосовуються в інтегрованій стратегії моніторингу, щоб підвищити їх аналітичну спроможність: хімічна характеристика надає інформацію про рівні конкретних ксенобіотиків, тоді як біологічні дослідження використовують *in vitro* (клітини людини, тварин і бактерій) та *in vivo* (вищі рослини, ґрунтові мікроорганізми) моделі для оцінки реакцій, спричинених взаємодією потенційних рецепторів із забрудненим ґрунтом, з урахуванням біодоступності забруднювача, шляху впливу та споживання (Baderna et al., 2011).

Хімічне забруднення є одним із основних факторів деградації ґрунту, і воно може бути прямим результатом застосування пестицидів, добрив та змін ґрунту, а також наслідком вологого або сухого осадження забруднювачів повітря з природних та антропогенних джерел. Наявність органічних і неорганічних ксенобіотиків у ґрунті викликає широке занепокоєння, оскільки ці агенти можуть впливати на здоров'я людини та навколишнє середовище (Abrahams, 2002).

Багато вчених намагалися використати метод фіторемедіації для видалення органічних і металевих забруднювачів із ґрунтових вод і ґрунту (Arslan et al., 2017; Ashraf et al., 2019; Rai et al., 2020).

У деяких дослідженнях розглядалася фіторемедіація важких металів шляхом екстрагованої транслокації, накопичення, розподілу (He et al., 2020). В останні роки дослідження механізмів фіторемедіації тротилу та інших похідних від використання зброї досягли певного прогресу. Наприклад, фіторемедіацію тротилу пропонується проводити класичними шляхами відновного перетворення з утворенням гідроксильних сполук (Faisal et al., 2016; Rylott & Bruce, 2019).

Метою цього дослідження було встановлення можливого негативного впливу забруднення токсичними речовинами, внаслідок бойових дій, на стан ґрунтового покриву території Харківського району Харківської області за допомогою методу біотестування.

Матеріал і методи

У навчально-дослідній лабораторії еколого-токсикологічних досліджень навчально-наукового інституту екології Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна було проведено експериментальні дослідження по визначенню впливу фітотоксичних властивостей ґрунтів на ростові показники коренів та паростків тест-об'єкта *Avena sativa* L. з 5 моніторингових площадок.

Для визначення придатності насіння вищих рослин до біологічного тестування встановлювали концентрацію розчину еталонної речовини, що викликає зменшення довжини коренів і (або) паростків на 20 % за 120 год біотестування (ЕК₂₀₋₁₂₀) (Кривицька, 2020).

Як еталонну речовину використовували фенол (C₆H₅OH) кваліфікації ч.д.а. Вихідний розчин готували з концентрацією 1 г/дм³ C₆H₅OH. Для цього використовували дистильовану воду. З вихідного розчину готували серію розчинів від 100 до 200 мг/дм³ C₆H₅OH з інтервалом 25 мг/дм³, використовуючи дехлоровану водопровідну воду. Біотестування розчинів проводили впродовж 120 годин та за результатами експериментів розраховували ЕК₂₀₋₁₂₀.

Якщо одержана величина ЕК₂₀₋₁₂₀ знаходилась в експериментально встановленому діапазоні реагування тест-об'єкта, який дорівнює 89,5 – 194,5 мг/дм³ C₆H₅OH, партія насіння була придатна до біотестування.

Якщо ЕК₂₀₋₁₂₀ C₆H₅OH не відповідала встановленому діапазону реагування, партію насіння замінювали на нову (Кривицька, 2020).

Критерієм токсичності було зниження довжини паростків і коренів рослин за наступні 120 годин порівняно із контролем (зволоження відстояною дехлорованою водою).

На підставі підрахунку довжини коренів (паростків) у контролі та досліді розраховувались середні арифметичні, які використовувались для розрахунку відхилення довжин коренів (паростків) у досліді відповідно до контролю:

$$A = (X_k - X_d) / X_k \times 100\%, \quad (1)$$

де A – довжина коренів (паростків) у досліді відносно контролю, %;

X_k – середнє арифметичне довжини коренів (паростків) у контролі, мм;

X_d – середнє арифметичне довжини коренів (паростків) у досліді, мм.

Фітотоксичними вважались розчини, в яких значення будь-якого з перелічених критеріїв за результатами біотестування значуще відрізнялось від контролю.

Для оцінки забруднення ґрунтів використовували показник «ступінь забрудненості ґрунтів» відповідно до визначених рівнів пригнічення ростових процесів, кількісна характеристика якого виражається коефіцієнтом забрудненості ґрунтів ($K_{зг}$), при цьому коефіцієнт забрудненості ґрунтів диференціюють за рівнями пригнічення ростових процесів (Кривицька, 2020).

У табл. 1 наведено класифікацію якості ґрунтів за ступенем забрудненості.

Відбір зразків ґрунтів на моніторингових площадках було проведено в травні та серпні 2023 року, практично через рік після звільнення всієї досліджуваної території від російських загарбників, хоча артобстріли цієї території продовжуються і по сей день. На рисунку 1 та таблиці 2 наведено територію дослідження та моніторингові площадки на території Харківського району Харківської області.

Результати

Відповідно до проведених у травні 2023 року експериментальних досліджень було отримано наступні результати (рис. 2): найбільш виражені фітотоксичні властивості ґрунтів було визначено у с. Слобожанське та с. Борщова, де рівень забрудненості ґрунтів дорівнював IV класу якості – ґрунти брудні (див. табл. 1), що може свідчити про надлишковий вплив токсичних речо-



★ – моніторингові площадки.

Рис. 1. Розташування моніторингових площадок на території дослідження

вин, які знаходяться у ґрунтах в різних формах. Зважаючи на те, що зразки відбиралися в межах присадибних ділянок, у найменш забруднених, з нашої точки зору локаціях, то такий рівень забрудненості, скоріш за все, може бути результатом потрапляння різних хімічних токсичних сумішей внаслідок інтенсивних бойових дій. На інших моніторингових площадках фітотоксичні властивості ґрунтів знаходились на менших рівнях – III клас (ґрунти помірно забруднені) – селища Руські та Черкаські Тишки та II клас (ґрунти слабо забруднені) – с. Циркуни.

Таблиця 1

Класифікація якості ґрунтів за ступенем забрудненості

Клас якості ґрунтів	Рівень забрудненості ґрунтів	Рівні пригнічення ростових процесів (фітотоксичний ефект), %	Ступінь забрудненості ґрунтів, $K_{зг}$
I	Незабруднені	0–20	1,1
II	Слабко забруднені	20,1–40	1,2
III	Помірно забруднені	40,1–60	1,3
IV	Брудні	60,1–80	1,4
V	Дуже брудні	80,1–100	1,5

Таблиця 2

Місця розташування моніторингових площадок

№	Моніторингові площадки	Координати
1	с. Слобожанське	50.178080, 36.425021
2	с. Борщова	50.162632, 36.419528
3	с. Руські Тишки	50.133371, 36.413520
4	с. Черкаські Тишки	50.116423, 36.385882
5	с. Циркуни	50.082728, 36.378672

Як видно з отриманих у серпні 2023 року експериментальних даних з моніторингових площадок на території дослідження, фітотоксичні властивості ґрунтів загалом дещо знизились (рис. 3). На трьох моніторингових площадках: с. Слобожанське, с. Борщова та с. Руські Тишки – рівень забрудненості ґрунтів відповідав III класу (ґрунти помірно забруднені), а двох інших площадках (с. Черкаські Тишки та Циркуни) дорівнював II класу (ґрунти слабо забруднені).

Така тенденція, на нашу думку та думку інших фахівців, може бути пов'язана із поглинанням рослинами різних хімічних сполук (Michael et al., 2012; Lago-Vila et al., 2019). Перш за все, це поглинання та біотрансформація токсичних сполук аборигенними видами рослин, які в більшості випадків

є основною ланкою у процесах очищення ґрунтового покриву у місцевості, де вирощування культурних рослин може бути небезпечним для місцевого населення. Оскільки тротил, як компонент вибухових пристроїв і різноманітний набір важких металів, які можуть потрапляти у навколишнє середовище при інтенсивних бойових діях через певний час можуть становити серйозну загрозу для здоров'я людини та біотичної складової довкілля, необхідно проводити моніторингові дослідження із визначення рівня забрудненості компонентів довкілля та видаляти ці забруднювачі з навколишнього середовища (Banza et al., 2019). Традиційними методами видалення забруднюючих речовин із забрудненого ґрунту є хімічні та фізичні. Однак більшість із цих методів є відносно доро-

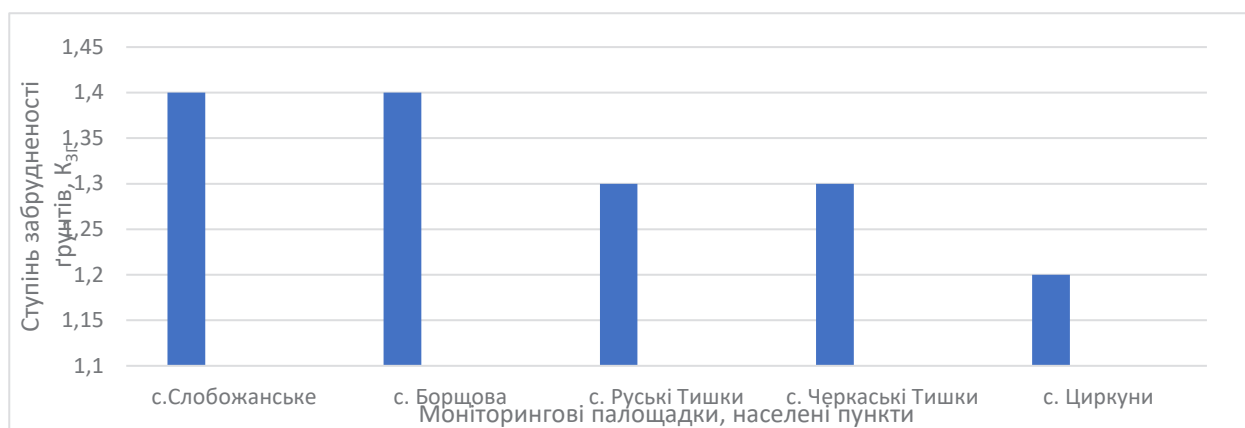


Рис. 2. Результати визначення фітотоксичних властивостей ґрунтів на моніторингових площадках Харківського району Харківської області, які були відібрані у травні 2023 року

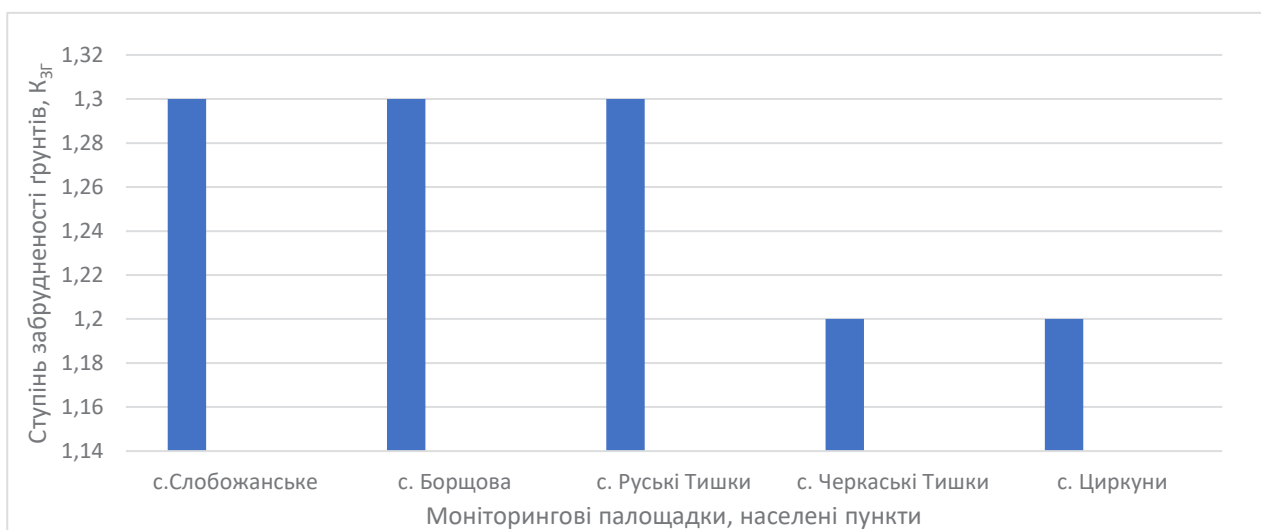


Рис. 3. Результати визначення фітотоксичних властивостей ґрунтів на моніторингових площадках Харківського району Харківської області, які були відібрані у серпні 2023 року

гими та можуть створювати токсичні побічні продукти. ФітореMediaція є екологічно чистим, економічно ефективним і прийнятним інструментом для очищення забруднених ґрунтових вод і ґрунту від забруднюючих речовин (Ortakci et al., 2019; Souza et al., 2018).

Обговорення

Згідно з оцінками, наданими у роботах європейських фахівців, вуглеводні та важкі метали є одними з основних забруднювачів ґрунтів Європейського Союзу, що становить близько 60% забруднення ґрунтів (Panagos et al., 2013). Крім того, на 28,3% загальної площі Європейського Союзу один або більше з цих металів і металоїди (As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn, Sb, Co, Ni) перевищують застосовану порогову концентрацію (Tóth et al., 2016). Враховуючи все це, разом зі згубним впливом вуглеводнів і важких металів на здоров'я людини та навколишнє середовище, наявність даних щодо потенційної токсичності ґрунтів, що містять ці забруднювачі та похідні від вибухівки, є надзвичайно важливою для визначення пов'язаної з ними небезпеки.

Фізико-хімічні методи традиційно застосовуються для аналізу якості ґрунту. Однак ця методологія не повністю відображає глобальні ефекти, які суміші ксенобіотиків можуть викликати в живих організмах. З цієї причини використання токсикологічних аналізів з використанням різних

модельних організмів є важливим інструментом для з'ясування потенційного впливу ґрунту.

Висновки

За результатами моніторингових досліджень, які були проведено навесні та влітку 2023 року було встановлено, що має місце незадовільний стан ґрунтового покриву на всіх досліджуваних площадках. Найвищий рівень забрудненості ґрунтів було визначено у с. Слобожанське та с. Борщова у травні 2023 року і дорівнював IV класу якості – ґрунти брудні, що може слугувати доказом того, що дана територія була найбільш забруднена (уражена) внаслідок бойових дій.

Проведення моніторингових спостережень одразу після закінчення активних бойових дій може надати змогу визначити рівень забрудненості ґрунтового покриву та надати можливість оцінити шкоду (збиток), який було спричинено довкіллю. Остаточну відповідь на питання щодо шкідливості ґрунтів для біологічних об'єктів у випадку їх полікомпонентного забруднення можуть дати тільки біологічні методи дослідження стану ґрунтового покриву, адже експертним шляхом дуже важко врахувати і токсичність окремих забруднюючих речовин, і їхню поведінку в ґрунті, і буферні властивості останнього, не говорячи вже про можливість синергізму чи антагонізму хімічних елементів.

Список використаної літератури

- Кривицька І.А. Діагностика та моніторинг забруднення ґрунтів важкими металами в урбанізованих ландшафтах Приазов'я : дис. ... канд. біол. наук : 03.00.18. Харків, 2020. 187 с.
- Abrahams P.W. Soils: their implications to human health. *Science of The Total Environment*. Vol. 291, Issues 1–3, 2002. pp. 1–32. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)01102-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01102-0).
- Arslan M., Imran A., Khan Q.M., Afzal M. Plant-bacteria partnerships for the remediation of persistent organic pollutants *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, 2017. pp. 4322–4336. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4935-3>.
- Ashraf S., Ali Q., Zahir Z.A., Ashraf S. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 174, 2019. pp. 714–727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068>.
- Baderna D. et al. A combined approach to investigate the toxicity of an industrial landfill's leachate: Chemical analyses, risk assessment and in vitro assays. *Environmental Research*. Vol. 111, Issue 4, 2011. pp. 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.01.015>.
- Banza C., Nkulu L., Casas L., Haufroid V., Putter T. De. Europe PMC Funders Group Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo. 2019. 1, pp. 495–504. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0139-4>.
- Elizabeth L., Neil R., Bruce C. Right on target: using plants and microbes to remediate explosives. *International Journal of Phytoremediation*, 21, 2019. pp. 1051–1064. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1606783>.
- Evangelou W.H., Hockmann K., Pokharel R., Jakob A., Schulin R., Accumulation of Sb, Pb, Cu, Zn and Cd by various plants species on two different relocated military shooting range soils. *Journal of Environmental Management*. Vol. 108, 2012. pp. 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.044>.

- He C., Zhao Y., Wang F., Oh K., Zhao Z., Wu C., Zhang X., Chen X., Liu X. Phytoremediation of soil heavy metals (Cd and Zn) by castor seedlings: tolerance, accumulation and subcellular distribution. *Chemosphere*. 252, 2020. p. 126471. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126471>.
- Homma-Takeda S., Hiraku Y., Ohkuma Y., Oikawa S., Murata M., Ogawa K., Iwamuro T., Li S., Sun G.F., Kumagai Y., Shimojo N., Kawanishi S. 2,4,6-Trinitrotoluene-induced reproductive toxicity via oxidative DNA damage by its metabolite. *Free Radic. Res.* 36 (5), 2002. pp. 555–566. <https://doi.org/10.1080/10715760290025933>.
- Lago-Vila M., Rodríguez-Seijo A., Vega F.A., Arenas-Lago D. Phytotoxicity assays with hydroxyapatite nanoparticles lead the way to recover firing range soils. *Science of The Total Environment*. Vol. 690, 2019. pp. 1151–1161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.496>.
- Ortakci S., Yesil H., Tugtas A.E. Ammonia removal from chicken manure digestate through vapor pressure membrane contactor (VPMC) and phytoremediation. *Waste Manag.* 85, 2019. pp. 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.033>.
- Panagos P., Liedekerke V., Yigini M., Montanarella L. Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network. *Journal of environmental and public health*. 2013. T. 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/158764>.
- Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*, Vol. 837, 2022. P. 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865>.
- Rai P.K., Kim K.H., Lee S.S., Lee J.H. Molecular mechanisms in phytoremediation of environmental contaminants and prospects of engineered transgenic plants/microbes. *Sci. Total Environ.* 705, 2020. p. 135858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135858>.
- Souza W.D.M., Rodrigues W.S., Lima Filho L., Alves J.J.F., Oliveira T. Heavy metals uptake on *Malpighia emarginata* D.C. seed fiber microparticles: physicochemical characterization, modeling and application in landfill leachate. *Waste Manag.* 78, 2018. pp. 356–365. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.004>.
- Tóth G., Hermann T., Szatmári G., Pásztor L. Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Science of the total environment* 565, 2016. pp. 1054–1062. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.05.019>.
- Faisal M., Saquib Q., Alatar A.A., Al-Khedhairy A.A., Ahmed M., Ansari S.M., Alwathnani H.A., Dwivedi S., Musarrat J., Praveen S. Cobalt oxide nanoparticles aggravate DNA damage and cell death in eggplant via mitochondrial swelling and NO signaling pathway. *Biol. Res.* 49, 2016. pp. 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40659-016-0080-9>.

References (translated & transliterated)

- Kryvytska, I.A. (2020). Diahnostyka ta monitorynh zabrudnennia gruntiv vazhkymy metalamy v urbanizovanykh landshaftakh Pryazovia [Diagnosis and monitoring of soil pollution by heavy metals in urbanized landscapes of the Azov region]: dys. ... kand. biol. nauk : 03.00.18. Kharkiv. 187 s. [in Ukrainian].
- Abrahams, P.W. (2002). Soils: their implications to human health. *Science of The Total Environment*. Vol. 291, Issues 1–3, pp. 1–32. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(01\)01102-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(01)01102-0) [in English].
- Arslan, M., Imran, A., Khan, Q.M., & Afzal, M. (2017). Plant–bacteria partnerships for the remediation of persistent organic pollutants *Environ. Sci. Pollut. Res.* 24, pp. 4322–4336. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4935-3> [in English].
- Ashraf, S., Ali, Q., Zahir, Z.A., & Asghar, S. (2019). Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 174, pp. 714–727. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.02.068> [in English].
- Baderna, D., et al. (2011). A combined approach to investigate the toxicity of an industrial landfill's leachate: Chemical analyses, risk assessment and in vitro assays. *Environmental Research*. Vol. 111, Issue 4, pp. 603–613. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2011.01.015> [in English].
- Banza, C., Nkulu, L., Casas, L., Haufroid, V., & Putter, T.D. (2019). Europe PMC Funders Group Sustainability of artisanal mining of cobalt in DR Congo. 1, pp. 495–504. <https://doi.org/10.1038/s41893-018-0139-4> [in English].
- Elizabeth, L., Neil, R., & Bruce, C. (2019). Right on target: using plants and microbes to remediate explosives. *International Journal of Phytoremediation*, 21, pp. 1051–1064. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1606783> [in English].

Evangelou, W.H., Hockmann, K., Pokharel, R., Jakob, A., & Schulin, R. (2012). Accumulation of Sb, Pb, Cu, Zn and Cd by various plants species on two different relocated military shooting range soils. *Journal of Environmental Management*. Vol. 108, pp. 102–107. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.04.044> [in English].

He, C., Zhao, Y., Wang, F., Oh, K., Zhao, Z., Wu, C., Zhang, X., Chen, X., Liu, X. (2020). Phytoremediation of soil heavy metals (Cd and Zn) by castor seedlings: tolerance, accumulation and subcellular distribution. *Chemosphere*. 252, p. 126471. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126471> [in English].

Homma-Takeda, S., Hiraku, Y., Ohkuma, Y., Oikawa, S., Murata, M., Ogawa, K., Iwamuro, T., Li, S., Sun, G.F., Kumagai, Y., Shimojo, N., & Kawanishi, S. (2002). 2,4,6-Trinitrotoluene-induced reproductive toxicity via oxidative DNA damage by its metabolite. *Free Radic. Res.* 36 (5), pp. 555–566. <https://doi.org/10.1080/10715760290025933> [in English].

Lago-Vila, M., Rodríguez-Seijo, A., Vega, F.A., & Arenas-Lago, D. (2019). Phytotoxicity assays with hydroxyapatite nanoparticles lead the way to recover firing range soils. *Science of The Total Environment*. Vol. 690, pp. 1151–1161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.496> [in English].

Ortakci, S., Yesil, H., & Tugtas, A.E. (2019). Ammonia removal from chicken manure digestate through vapor pressure membrane contactor (VPMC) and phytoremediation. *Waste Manag.* 85, pp. 186–194. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.12.033> [in English].

Panagos, P., Van Liedekerke, M., Yigini, Y., & Montanarella, L. (2013). Contaminated sites in Europe: review of the current situation based on data collected through a European network. *Journal of environmental and public health*. <https://doi.org/10.1155/2013/158764> [in English].

Pereira P., Bašić F., Bogunovic I., Barcelo D. (2022). Russian-Ukrainian war impacts the total environment. *Science of The Total Environment*, Vol. 837, p. 155865. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155865> [in English].

Rai, P.K., Kim, K.H., Lee, S.S., & Lee, J.H. (2020). Molecular mechanisms in phytoremediation of environmental contaminants and prospects of engineered transgenic plants/microbes. *Sci. Total Environ.* 705, p. 135858. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135858> [in English].

Souza, W.D.M., Rodrigues, W.S., Lima Filho, L., Alves, J.J.F., & Oliveira, T. (2018). Heavy metals uptake on *Malpighia emarginata* D.C. seed fiber microparticles: physicochemical characterization, modeling and application in landfill leachate. *Waste Manag.* 78, pp. 356–365. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.06.004> [in English].

Tóth, G., Hermann, T., Szatmári, G., & Pásztor, L. (2016). Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Science of the total environment*. 565, pp. 1054–1062. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.05.019> [in English].

Faisal, M., Saquib, Q., Alatar, A.A., Al-Khedhairy, A.A., Ahmed, M., Ansari, S.M., Alwathnani, H.A., Dwivedi, S., Musarrat, J., & Praveen, S. (2016). Cobalt oxide nanoparticles aggravate DNA damage and cell death in eggplant via mitochondrial swelling and NO signaling pathway. *Biol. Res.* 49, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40659-016-0080-9> [in English].

Отримано: 28.01.2024

Прийнято: 21.02.2024