

УДК 504.054

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.4>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВІДХОДІВ СОНЯЧНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА ҐРУНТ

Самойленко Н.М., Корогодська А.М., Катенін В.Д.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, 61002, м. Харків

nataliia.samoilenko@khpi.edu.ua, alla.korohodska@khpi.edu.ua, vadym.katenin@mit.khpi.edu.ua

Світова тенденція використання сонячної енергії є важливим напрямком для сталого розвитку та екологічної стабільності країни. Україна активно розвиває виробництво сонячної енергії, проте війна призвела до значних втрат у сфері сонячної енергетики. Руйнування сонячних електростанцій та приватних домогосподарств, що використовували сонячну енергію, стало причиною утворення значної кількості відходів сонячних фотоелектричних панелей. Це, в першу чергу, стосується Херсонської, Миколаївської та Запорізької областей, де розташовані найбільші сонячні електростанції в країні та проводились чи проводяться активні військові дії.

Серед компонентів зруйнованих сонячних панелей, однією з потенційно небезпечних складових для навколишнього середовища є електрична частина, яка містить мідь. Цей важкий метал чинить негативний вплив на довкілля, а його потрапляння в землю може негативно вплинути на якість ґрунту, водних ресурсів та на здоров'я людини.

Для дослідження даного негативного чинника використовувались дернові ґрунти, що були відібрані у с. Великий Раковець, Закарпатській області, та мідні дроти, які застосовуються у конструкції електричної частини сонячної фотоелектричної панелі. Експеримент проходив у природних умовах, що характеризувались сезонною зміною. Модельний дріт мав механічні пошкодження та обпалення, які характерні для військового ураження електричних провідників. Проведений абсорбційно-спектрометричний аналіз ґрунту показав перевищення ГДК міді у порівнянні з еталонним зразком у всіх випадках: у 2,74 рази при дослідженні дроту з механічним пошкодженням та у 1,34 рази – дроту з обпаленням силіконової ізоляції. Водночас валова концентрація міді у ґрунті, що мав контакт з провідником, зростала до 40 разів.

Результати дослідження можуть бути використані у системі моніторингового аналізу ґрунтів, які постраждали від бойових дій, а також ґрунтів, на яких тривалий час розміщуються відходи сонячних фотоелектричних панелей. Отримані експериментальні дані доцільно застосувати при оцінці екологічного стану ґрунтів певних районів України, що необхідно при розробці науково-обґрунтованих заходів поліпшення екологічної ситуації території країни та зменшення екологічної небезпеки, зумовленої наслідками війни. *Ключові слова:* сонячні фотоелектричні панелі, відходи, ґрунт, мідь, забруднення.

### Research on the impact of solar photovoltaic panel waste on soil. Samoilenko N., Korogodska A., Katenin V.

The global trend of using solar energy is an important step towards sustainable development and environmental stability. Ukraine is actively developing solar energy production, but the war has led to significant losses in this field. The destruction of solar power plants and private households that used solar energy has resulted in a significant amount of waste from solar photovoltaic panels. This is particularly concerning in the Kherson, Mykolaiv, and Zaporizhzhia regions, where the largest solar power plants in the country are located and where active military operations have taken place or are currently taking place.

Among the components of destroyed solar panels, one of the potentially hazardous components for the environment is the electrical part that contains copper. This heavy metal has a negative impact on the environment, and its entry into the soil can negatively affect the quality of soil, water resources, and human health.

To investigate this negative factor, sod soils were used, which were taken from the village of Velykyi Rakovets, Zakarpattia region, along with copper wires that are used in the construction of the electrical part of solar photovoltaic panels. The experiment was carried out under natural conditions characterized by seasonal changes. The model wire had mechanical damage and burns, which are typical of military damage to electrical conductors. The absorption spectroscopic analysis of the soil showed an excess of the MPC of copper compared to the reference sample in all cases: by 2.74 times when studying the wire with mechanical damage and by 1.34 times – the wire with burns of silicone insulation. At the same time, the gross concentration of copper in the soil in contact with the conductor increased up to 40 times.

The results of the study can be used in the monitoring and analysis system for soils that have been affected by military actions, as well as soils where waste from solar photovoltaic panels has been deposited for a long time. The experimental data obtained should be applied when assessing the environmental situation of soils in specific regions. This is necessary for the development of scientifically-based measures to improve the environmental situation in the territories of Ukraine. *Key words:* solar photovoltaic panels, waste, soil, copper, pollution.

**Постановка проблеми.** Сучасний підхід до використання альтернативної енергетики, що поширюється у світі [1, 2], стимулює отримання електричної енергії з використанням сонячних електричних панелей. Україна долучається до цієї тенденції і у довоєнний період активно нарощувала потенціал сонячних електростанцій. Під час військових

дій країна втратила третину потужності сонячної енергетики [3], а руйнування станцій призвело до утворення великої кількості пошкоджених сонячних фотоелектричних панелей (СФЕП), більша частина яких переходить у відходи. Кількість таких відходів особливо зросла з урахуванням ураження СФЕП, що використовувались у домогосподарствах, розташова-

них у районах активних військових дій (Херсонська, Запорізька обл. та ін.). В результаті ударів військової зброї панелі зазнають механічного пошкодження і забруднення вибуховими речовинами, що у тому числі містять важкі метали. Електрична частина панелі, яка є обов'язковим елементом конструкції, піддається руйнуванню і опалюванню, та стає ще додатковим джерелом забруднення довкілля іонами міді. Переробка пошкоджених або відпрацьованих СФЕП є складним та багаторівневим процесом [4]. В умовах війни належна організація поводження з відходами СФЕП ускладнена, а у випадках тимчасово окупованих територій взагалі неможлива. Тому велика кількість відходів СФЕП може тривалий час накопичуватись у місцях їх випадкового розташування і чинить негативний вплив на довкілля, у тому числі на ґрунт.

**Актуальність дослідження.** Забруднення і порушення ґрунтів внаслідок військових дій для України є надзвичайно важливою та складною проблемою, яка потребує вирішення як у теперішній час, так і відбудовний період. Виведені з ладу сонячні фотоелектричні панелі набувають небезпечних властивостей, зумовлених, в першу чергу, руйнуванням електричного блоку, що містить провідники електричного струму. Іони металу механічно пошкодженого і опаленого дроту акумулюються у ґрунті та можуть переміщуватись з його масами, а також надходити у природні води. Негативна дія важкого металу добре досліджена і стосується міграції забруднюючої речовини у рослини, потраплянні через них в організм людей та зміни властивостей ґрунту. На сьогодні практично відсутні дослідження щодо забруднення вітчизняних ґрунтів відходами сонячних фотоелектричних панелей, особливо небезпечним джерелом яких є електрична частина. Зважаючи на зазначене, дослідження щодо забруднення ґрунтів міддю є вельми актуальними як з теоретичного, так і з практичного аспекту.

**Зв'язок авторського доробку із важливими та практичними завданнями.** Вплив відходів СФЕП на ґрунт пов'язується з хімічним забрудненням, що викликане надходженням міді. Внесення іонів міді у ґрунт може викликати зміну його властивостей, негативні порушення ґрунтової екосистеми, а при попаданні у організм людини – фактором ризику виникнення патологій. Тому з практичної точки зору необхідна актуальна інформація щодо наявності у ґрунті важкого металу, яка може бути використана у моніторингу забруднення ґрунтів на постраждалих від війни територіях та у подальшому при проведенні відповідної відновлювальної діяльності. Дослідження узгоджуються з завданнями плану відновлення України за проектними пропозиціями Національної програми «Відбудова чистого та захищеного середовища» [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Взаємодія провідників струму та ґрунту вивчається

давно та розглядається з точки зору руйнування металу та ізоляції кабелю чи дроту. Руйнування оболонки електричного провідника є процесом, який передуює активній корозії металу. Процес залежить від умов ґрунтового середовища, що у тому числі включає чинники вологості ґрунту, наявності в ньому хімічних реагентів та ін. [6].

Зважаючи на властивість утворювати захисну окисну плівку, мідь несприятлива до корозії у більшості ґрунтів. Водночас наявність у ґрунті солей хлору, сірки, органічних кислот, а також насиченість киснем сприяє її руйнуванню та протіканню корозії. Виявлено, що найбільша швидкість корозії виявляється в аерованих ґрунтах, особливо глинистих ґрунтах з високим вмістом органічних речовин, що характеризуються підвищеним рівнем сульфідів, сульфатів та/або хлоридів і низькими значеннями рН [7].

Визначення впливу міді на ґрунт досліджувалось багатьма вченими. Відзначається, що забруднення ґрунту мікроелементами, такими як мідь, може вплинути на його функціонування [8]. Вказується, що мідь малорухома у ґрунті, має тенденцію накопичуватись у його верхніх шарах [9] та не піддається біологічному розкладу, а забруднений ґрунт може привести до її підвищеного споживання організмами, що викликає екологічний ризик [9, 10]. Перевищення концентрації міді у ґрунті зумовлює пошкодження тканин, витягнутість клітин кореня, зміну проникності мембран та інгібування переносу електронів при фотосинтезі [11]. На розподіл міді у ґрунті впливають кліматичні, геологічні та ґрунтові фактори [12]. Отже загальною закономірністю забруднення різних ґрунтів міддю може бути порушення росту рослин, поступове зниження в ньому чисельності мікроорганізмів, зміна властивостей ґрунту.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття та новизна.** Проблема забруднення і відновлення ґрунтів України під час війни є у центрі уваги найважливіших проблем країни. Від війни страждають майже усі регіони України і процес вивчення ускладнюється тим, що територія країни характеризується різними за типом і властивостями ґрунту. Тому дослідження, метою якого є визначення впливу на ґрунти пошкоджених під час військових дій СФЕП, може відзначатись науковою новизною, а також практичною цінністю стосовно прийняття рішень з покращання екологічної обстановки територій.

**Новизна.** Дослідження щодо проблеми забруднення і відновлення ґрунтів України під час війни відзначається науковою новизною, оскільки у теперішній час у науковій літературі практично не представлені дослідження з даної проблеми, і, зокрема забруднення ґрунтів міддю, яка міститься у пошкоджених СФЕП.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** У якості об'єкта дослідження вибрано

грунт із необробленого поля у с. Великий Раківець Закарпатської області. Відбір здійснювався з урахуванням правил відбору проб, що регламентуються нормативними документами [13, 14]. Умови відбору зразків з однієї ділянки бути однаковими. Точкові проби відбирались методом конверта з п'яти точок на глибині від 1 до 25 см. Кожна маса проби складала 100–200 г. Середній зразок ґрунту з дослідної точки отримувалася змішуванням 3–5 окремих відібраних зразків; маса об'єднаної проби становила близько 1 кг.

Для дослідження використовувався дріт із сполучного короба сонячної панелі марки 12AWG. Мідний дріт мав довжину 5 та 12 см та силіконову ізоляцію. Використовувався дріт двох типів: з частковим механічним пошкодженням та обпалений з руйнуванням ізоляції.

Дріт розміщувався у ємності за схемою: 2 частини дроту на глибину 10 см (середина горщика), та 2 на поверхні, на глибині 1 см. Дослідження проводились на протязі березня – травня у польових умовах.

Після закінчення експерименту висушений ґрунт аналізувався на валовий вміст міді абсорбційно-спектрофотометричним методом. Методика визначення відповідає стандарту ISO 22036:2008 [15].

**Викладення основного матеріалу.** У результаті досліджень виявлено, що у всіх зразках ґрунту, що мав контакт з електричним провідником, вміст міді перевищує ГДК, що складає 55 мг/кг [16]. Порівняльний вміст міді у ґрунті представлений на рис. 1.

Ґрунт, вибраний для дослідження, відноситься до дернових (рис. 2).

В районі дослідження зустрічаються дернові опідзолені та оглеєні ґрунти.

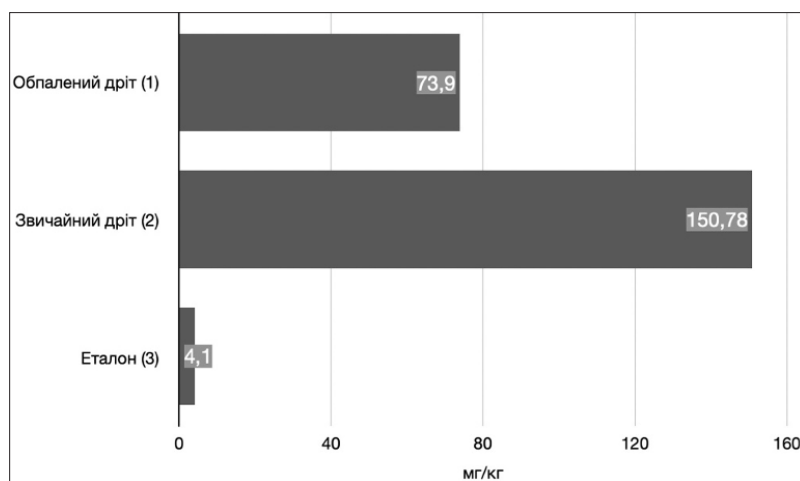


Рис. 1. Дослідження вмісту міді у ґрунті



Рис. 2. Типи ґрунтів Закарпатської області [17]

тів може суттєво відрізнитися в залежності від місцезнаходження, але особливістю для дернових опідзолених та оглеєних ґрунтів є високий вміст гумусу та низька кислотність. Глини, що проявляють високу адсорбційну здатність, у дернових ґрунтах присутні у незначній кількості.

Опідзолені ґрунти мають менший вміст гумусу та більш складний склад. Вони зазвичай бідніші на макро- та мікроелементи, а їх кислотність може бути досить високою. Глини в опідзолених

ґрунтах містяться у менших кількостях порівняно з дерновими.

Оглеєні ґрунти зазвичай характеризуються значною кількістю органічних решток, що можуть бути корисними для росту рослин. Однак, вони також можуть бути бідні на кисень та інші елементи. Глини в оглеєних ґрунтах містяться у менших кількостях порівняно з дерновими ґрунтами.

Дернові ґрунти можуть містити значну кількість оксидів заліза та алюмінію, що відіграють важливу

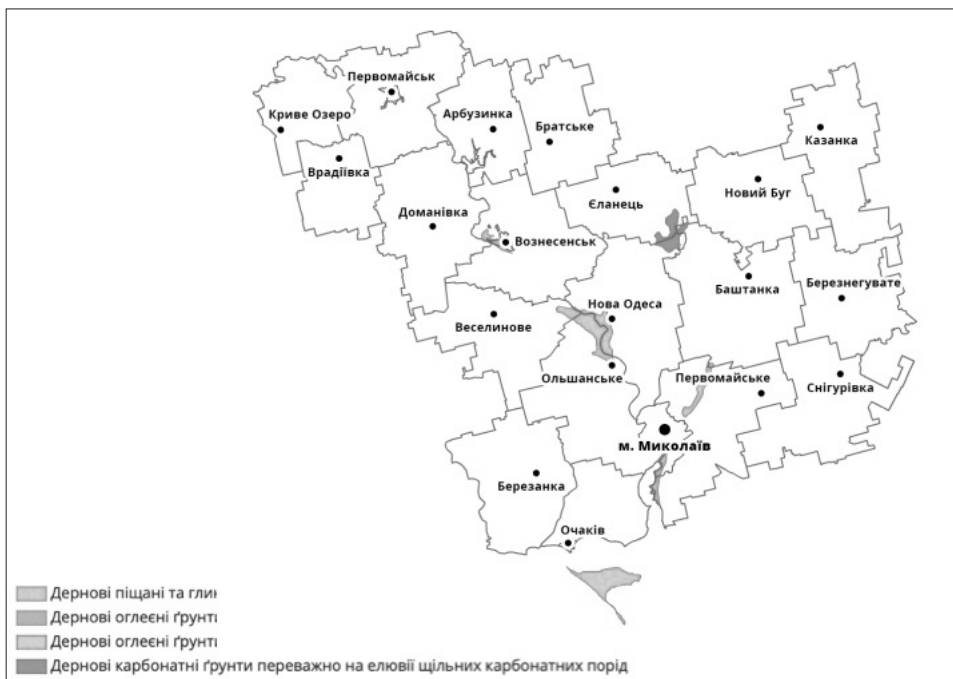


Рис. 3. Типи ґрунтів Херсонської області [17]

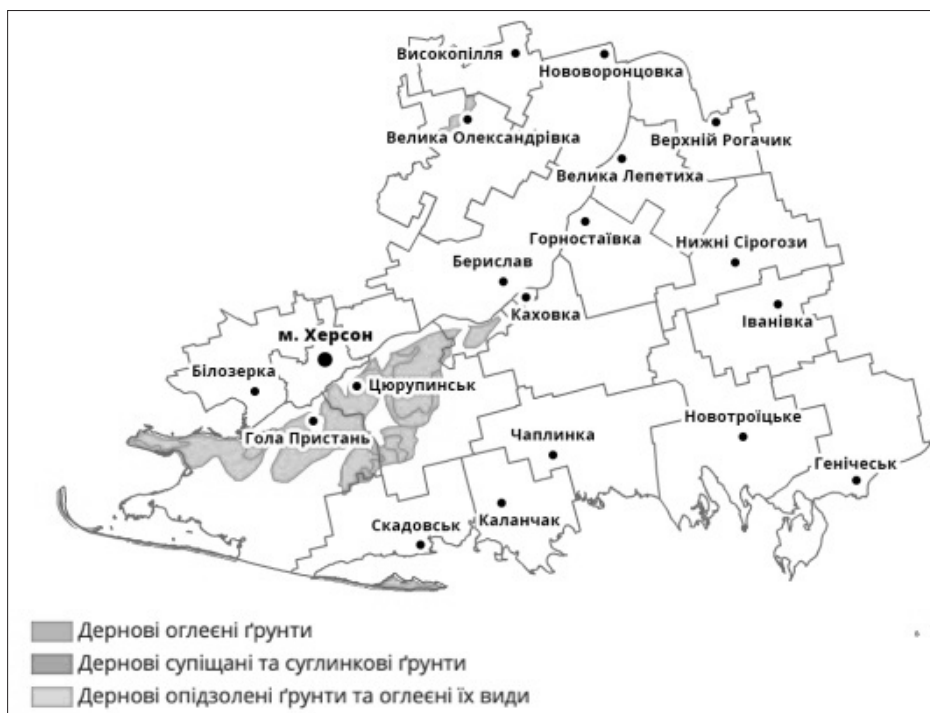


Рис. 4. Типи ґрунтів Миколаївської області [17]

роль у підтримці структури ґрунту та його хімічних властивостей.

Мідь може взаємодіяти з оксидами та гідроксидами заліза та марганцю, що присутні в дернових ґрунтах. Це може призвести до утворення мідних оксидів та гідроксидів, які можуть бути менш розчинні в воді та менш мобільні в ґрунті. Водночас ефект від взаємодії міді з ґрунтом залежить від конкретних умов, таких як рівень кислотності та наявність інших елементів у ґрунті [18, 19].

Аналогічні досліджуваному ґрунту на території України дернові ґрунти розташовані у Херсонській (рис. 3) та Миколаївській області (рис. 4). Слід зазначити, що у Херсонській області знаходяться і найбільші сонячні станції.

**Головні висновки.** Мідні дроти, що залишаються у ґрунті після пошкодження СФЕП, є джерелем

небезпеки забруднення ґрунту важким металом. У природних умовах досить швидко провокується процес переходу іонів міді у ґрунт і вміст металу може перевищувати нормативний рівень. Як наслідок цього явища, у місці розташування відходів СФЕП може проходити зміна властивостей ґрунту, міграція важкого металу у поверхневі води. Також негативний вплив здійснюється на рослини і опосередковано на здоров'я людей.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Проведені дослідження надають дані, що можуть бути використані при аналізі та оцінці ґрунтів, які постраждали від бойових дій на територіях СЕС і домогосподарств, а також при плануванні і проведенні діяльності з визначення стану ґрунтів в регіонах України та діяльності зі зменшення екологічної небезпеки наслідків війни.

### Література

1. Chowdhury M.S., Rahman K.S., Chowdhury T., Nuthammachot N., Techato K., Akhtaruzzaman M., Tiong S.K., Sopian K., Amin N. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. *Energy Strategy Reviews*, 27, 2020.
2. Самойленко Н.М., Катенін В.Д., Баранова А.О. Переробка та утилізація фотоелектричних панелей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків : НТУ «ХПІ», 2021, № 2(8), С. 121–126.
3. Через війну в Україні не працюють 90% потужностей вітрової енергетики. URL: <https://eco.rayon.in.ua/news/541688-cherez-viynu-v-ukraini-ne-pratsuyut-90-potuzhnostey-vitrovoi-energetiki> (дата звернення: 02.09.2023).
4. Катенін В.Д., Самойленко Н.М. Сучасний стан операцій поводження з відходами сонячних фотоелектричних панелей в Україні. *Вісник Хмельницького національного університету*. Сер.: Технічні науки, 2022, 5(313), 89–93.
5. План відновлення України. URL: <https://recovery.gov.ua> (дата звернення: 2 вересня 2023).
6. Кучерява І.М. Чинники надійної експлуатації сучасних силових кабелів із твердою ізоляцією. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*, вип. 64, Травень 2023, с. 053, doi:10.15407/publishing2023.64.053.
7. Camitz G., Vinka T.-G. Corrosion resistance of copper in Swedish soils. *CEOCOR Congress 2003, Sicily*. URL: [https://ceocor.lu/download/2003\\_sicily/CAMITZ-VINKA-2003-Corrosion-Resistance-of-Copper-in-Swedish-Soils.pdf](https://ceocor.lu/download/2003_sicily/CAMITZ-VINKA-2003-Corrosion-Resistance-of-Copper-in-Swedish-Soils.pdf) (дата звернення: 2 вересня 2023).
8. Panagos P., Hiederer R., Borrelli P., Lugato E., Montanarella L., Kempen B. Mapping risks associated with soil copper contamination using availability and bio-availability proxies at the European scale. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(11), 2018, 10645–10655.
9. De Melo E.E.C., de Oliveira L.M., Santos C.F., Alves M.C., Pereira F.J., de Araújo M.C.U. Soil contamination by copper: Sources, ecological risks, and mitigation strategies in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(29), 2023, 44885–44898.
10. Huang J., Li J., Li W., Liu X., Du H. Does Copper Contamination Affect Soil CO<sub>2</sub> Emissions? A Literature Review. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 2021.
11. Шепелюк М.О. Визначення вмісту важких металів у ґрунтах різних екологічних зон міста Луцька. *Вісник Житомирського національного агроекологічного університету*, 2(107), 2019, 41-50. DOI: <https://doi.org/10.32851/2226-0099.2019.107.41>
12. European Soil Data Centre. Copper in topsoils. URL: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/themes/copper-topsoils> (дата звернення: 2 вересня 2023).
13. ДСТУ ISO 10381-2:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Частина 2. Настанови з методів відбирання проб. Київ: Держспоживстандарт України, 2006, 31 с.
14. ДСТУ 4287:2004 Якість ґрунту. Відбирання проб. Київ: Держспоживстандарт України, 2005, 5 с.
15. ISO 22036:2008 Soil quality – Determination of trace elements in extracts of soil by inductively coupled plasma – atomic emission spectrometry.
16. Кураєва І.В., Рога І.В., Сорокіна Л.Ю., Голубцов О.Г. Оцінка вмісту важких металів та умов їх міграції в агроландшафтах Тернопільської області. *Вісник НУБіП України*. Серія: Агроекологія, 1, 2019, 114–121.
17. Карта ґрунтів України. URL: <https://superagronom.com/karty/karta-gruntiv-ukrainy> (дата звернення: 2 вересня 2023).
18. Luo C., Shen Z., Li X. Copper speciation and adsorption-desorption behavior in soils amended with copper sulfate. *Journal of Environmental Sciences*, 21(11), 2009, 1479–1485.
19. Mousavi S. R., Kaveh-Farsani Z., & Homae M. Copper mobility in soil: A review of mechanisms, pool size, and controlling factors. *Pedosphere*, 29(5), 2019, 541–552.