

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ГІРЧИЦІ, СОНЯШНИКА ТА КУКУРУДЗИ У ФІТОРЕМЕДІАЦІЇ ҐРУНТІВ, ЗАБРУДНЕНИХ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ (Pb, Cu)

**Анотація.** *Інтенсивне техногенне навантаження та наслідки воєнних дій призводять до накопичення у ґрунтах важких металів, зокрема свинцю і міді. Їхня токсичність негативно впливає на агроєкосистеми та становить загрозу харчовим ланцюгам. Перспективним напрямом очищення є фітореємедіація — природоорієнтований метод, що ґрунтується на здатності рослин поглинати, трансформувати, фіксувати або стабілізувати токсичні елементи.*

**Ключові слова:** фітореємедіація, важкі метали, свинець, мідь, гірчиця, соняшник, кукурудза.

Метою дослідження є оцінка ефективності гірчиці сарептської, соняшника та кукурудзи у процесах фітоекстракції та фітостабілізації свинцю і міді у забруднених ґрунтах. У процесі дослідження застосовано метод аналізу наукових джерел щодо механізмів акумуляції  $Pb^{2+}$  і  $Cu^{2+}$  рослинами, метод порівняння ефективності різних культур у процесах фітореємедіації, а також метод узагальнення для формулювання висновків щодо доцільності їх комбінованого використання.

**Результати.** Мідь належить до мікроелементів, життєво необхідних у невеликих концентраціях, проте у надлишку стає токсичною для більшості культур. У рослинах вона переважно зв'язується з амінокислотами, білками й цукрами, проте перевищення порогових рівнів призводить до руйнування пігментів і пригнічення фотосинтезу. Свинець, навпаки, характеризується низькою рухливістю в рослинних тканинах, здебільшого накопичується у кореневій зоні, обмежено транспортується у надземну частину та є надзвичайно токсичним у підвищених концентраціях. Його негативна дія проявляється у порушенні клітинного метаболізму, активації процесів перекисного окиснення ліпідів і розвитку хлорозів.

*Brassica juncea* вважається одним із найперспективніших видів для фітоекстракції важких металів, оскільки здатна до гіперакумуляції  $Pb^{2+}$  і  $Cu^{2+}$ . Ця культура характеризується швидким ростом, значною біомасою, розвиненою кореневою системою та ефективною системою хелатування іонів металів завдяки синтезу глутатіону і фітохелатинів. Дослідження засвідчили, що застосування хелатуючих агентів, зокрема ЕДТА, значно підвищує коефіцієнт транслокації і швидкість вносу металів у надземну масу, хоча водночас створює ризики вторинного забруднення [3]. Встановлено, що в умовах застосування ЕДТА вміст свинцю у верхньому шарі ґрунту може знижуватися на 10–15% лише за один вегетаційний сезон, а концентрація металу в сухій біомасі гірчиці сягає десятків грамів на кілограм. Завдяки цим властивостям *Brassica juncea* розглядається як ключовий вид для активної фітоекстракції.

*Helianthus annuus* проявляє високу ефективність у поглинанні та транслокації міді. Розгалужена коренева система й інтенсивна транспірація забезпечують активний масоперенос іонів у надземну біомасу. Соняшник здатний накопичувати

$\text{Cu}^{2+}$  у значних кількостях, підтримуючи при цьому відносно високий рівень продуктивності навіть за умов середнього забруднення. Його перевагою є також адаптивність до різних типів ґрунтів і агротехнічних умов. Водночас за надлишкових концентрацій міді у тканинах спостерігаються пігментні порушення та гальмування ростових процесів, що потребує оптимізації агротехнологій, зокрема інокуляції мікробними препаратами, застосування органічних добавок та контролю кислотності ґрунту.

*Zea mays* відрізняється чутливістю до токсичної дії  $\text{Pb}^{2+}$  і  $\text{Cu}^{2+}$ , що проявляється у зниженні вмісту хлорофілів, розвитку хлорозів і некрозів, пригніченні росту. Проте за умов помірного забруднення та оптимізації рН і мінерального живлення кукурудза зберігає високу біомасу й життєздатність. Її стратегія щодо важких металів має подвійний характер: свинець здебільшого акумулюється у кореневій зоні, що забезпечує ефективну фітостабілізацію та зниження мобільних форм у ґрунті, тоді як мідь транспортується у надземну масу у помірних кількостях [2]. Завдяки цьому *Zea mays* доцільно використовувати у комплексних схемах ремедіації – як стабілізатор  $\text{Pb}^{2+}$  та додатковий екстрактор  $\text{Cu}^{2+}$ .

Узагальнений аналіз свідчить, що найвищий потенціал для гіперакумуляції  $\text{Pb}^{2+}$  і  $\text{Cu}^{2+}$  має гірчиця сарептська завдяки своїм біохімічним особливостям. Соняшник найбільш ефективний у процесі виведення іонів міді завдяки потужній кореневій системі й інтенсивній транспірації. Кукурудза ж оптимально використовується для стабілізації свинцю у кореневій зоні та часткової акумуляції  $\text{Cu}^{2+}$  за умов середнього рівня забруднення. Таким чином, комбіноване застосування цих культур у сівозмінах або змішаних посівах дозволяє значно знижувати концентрацію мобільних форм важких металів у ґрунтах, забезпечуючи поступове відновлення їхньої природної родючості. *Brassica juncea* доцільно використовувати для інтенсивної фітоекстракції  $\text{Pb}^{2+}$  та  $\text{Cu}^{2+}$ , *Helianthus annuus* – для ефективного виведення іонів  $\text{Cu}^{2+}$ , а *Zea mays* – для стабілізації  $\text{Pb}^{2+}$  у кореневій зоні та часткової акумуляції  $\text{Cu}^{2+}$ . Комплексне впровадження цих підходів сприятиме зниженню екологічних ризиків, пов'язаних із забрудненням важкими металами, та забезпечить відновлення продуктивності сільськогосподарських угідь у середньостроковій перспективі.

#### Список використаних джерел

1. Інноваційні підходи до фіторемердіації та фіторекультивациі у сучасних системах землеробства: монографія / Я.Г. Цицюра, Ю.М. Шкатула, Т.А. Забарна, Л.В. Пелех. Вінниця: ТОВ «Друк», 2022. 1200 с.

2. Ha N., Sweat K.G., Conrow K.D., Haney R.S., Cahill T.M., LeBauer D.S., Leung M.C.K. Remediating toxic elements with sunflower, hemp, castor bean, & bamboo: an open dataset of harmonized variables. *Scientific Data*. 2025. Vol. 12(1). 905.

3. Rathika R., et al. Influence of biochar and EDTA on enhanced phytoremediation of lead contaminated soil by *Brassica juncea*. *Chemosphere*. 2021. Vol. 271. 129513.

*Науковий керівник – Петюх Г. П., к. б. н., професор*