УДК 581.1:581.526:546.56

ФІЗІОЛОГО-БІОХІМІЧНІ РЕАКЦІЇ МІКРОГРІНУ *HELIANTHUS ANNUUS L.*, *RAPHANUS SATIVUS L.* І *PISUM SATIVUM L.* НА ДІЮ $CuSO_4$

[1]Білак А. В., [1,2]Вакерич М. М., [1]Гасинець Я. С., [1]Глюдзик-Шемота М. Ю., [1]Вакерич Д. М., [1]Булина Р. В.

[1]ДВНЗ «Ужгородський національний університет»,
[2]Закарпатський науково-дослідний експертно-криміналістичний центр МВС України
E-mail: mykhailo.vakerich@uzhnu.edu.ua

Мікрогрін є інтенсивно зростаючим сегментом сучасного рослинництва та функціонального харчування, що пов'язано з високою концентрацією біологічно активних речовин у молодих рослинах. Водночас саме ця рання фаза розвитку характеризується підвищеною чутливістю до абіотичних чинників, зокрема до наявності важких металів у субстраті або поживному середовищі. Мідь (Cu) є есенціальним мікроелементом, який входить до складу численних ферментів і бере участь у процесах фотосинтезу, дихання та антиоксидантного захисту. Однак навіть незначне перевищення оптимальних концентрацій призводить до розвитку токсичних ефектів, що проявляються у порушенні ростових процесів, індукції оксидативного стресу та зміні метаболічної активності клітин. У контексті вирощування мікрогріну це має особливе значення, оскільки короткий цикл вирощування не дозволяє рослинам адаптуватися до стресу, а накопичення металів безпосередньо впливає на якість і безпечність продукції. Незважаючи на обмежену кількість досліджень, безпосередньо присвячених мікрогріну, численні експерименти на проростках і молодих рослинах дозволяють сформувати узагальнене уявлення про вплив сульфату міді ($CuSO_4$). Загальною закономірністю є дозозалежний ефект: дуже низькі концентрації можуть мати нейтральний або слабко стимулюючий вплив, тоді як підвищені концентрації швидко переходять у зону токсичності [4, 5].

Для соняшника (*Helianthus annuus* L.) показано, що концентрації $CuSO_4$ на рівні близько 0,00015% сприяють стимуляції росту кореневої системи, тоді як підвищення

концентрації до приблизно 0,015% призводить до різкого пригнічення росту пагонів. При цьому встановлено, що накопичення міді відбувається переважно в коренях, що свідчить про бар'єрну функцію кореневої системи щодо надходження металу до надземних органів [5]. Таким чином, для соняшника межа між стимулюючим і токсичним ефектом є вузькою, а концентрації вище ~0,01% вже мають виражений негативний вплив.

У редису (*Raphanus sativus* L.) чутливість до Cu^{2+} є значно вищою. Встановлено, що навіть концентрації на рівні приблизно 0,001–0,0015% $CuSO_4$ уже призводять до зниження схожості насіння, довжини кореня та пагона, а також до зменшення свіжої маси проростків. Подальше підвищення концентрації до ~0,015% є летальним для рослин. Дослідження також демонструють, що токсичний ефект супроводжується розвитком оксидативного стресу, зокрема накопиченням активних форм кисню та порушенням клітинного поділу і диференціації тканин [4]. Це свідчить про те, що редис може розглядатися як індикаторна культура для оцінки токсичності міді в системах вирощування мікрогріну.

Для гороху (*Pisum sativum* L.) характерною є проміжна чутливість до $CuSO_4$. Концентрації близько 0,0003% не викликають істотних змін у рості рослин, тоді як підвищення до приблизно 0,0015% призводить до пригнічення розвитку як кореневої, так і надземної частини. Одночасно спостерігається активація ферментів антиоксидантного захисту та стресових реакцій, зокрема пероксидаз та ІАА-оксидази [2]. Додатково показано, що застосування антиоксидантів, таких як аскорбінова кислота, може частково знижувати негативний вплив міді, що підтверджує ключову роль оксидативного стресу у механізмах токсичності [1].

Узагальнення наявних даних дозволяє стверджувати, що для ранніх стадій розвитку рослин, які відповідають фазі мікрогріну, безпечні концентрації $CuSO_4$ знаходяться в межах приблизно 0,0001–0,001%, тоді як концентрації на рівні ~0,001–0,01% і вище вже викликають токсичні ефекти різного ступеня вираженості залежно від виду рослин. Особливої уваги потребує редис, для

якого навіть мінімальні концентрації можуть бути критичними.

Отже, у технологіях вирощування мікрогріну $CuSO_4$ слід розглядати насамперед як потенційний токсикант, а не як стимулятор росту. Його використання потребує чіткої регламентації та попереднього експериментального підбору концентрацій для кожної культури окремо. Перспективними напрямами подальших досліджень є визначення гранично допустимих концентрацій для різних видів мікрогріну, оцінка накопичення міді у їстівній частині рослин та розробка підходів до зниження токсичного ефекту, зокрема шляхом застосування антиоксидантів або модифікації умов вирощування.

Список літератури

1. Abbas T., Tasadaq M., Ahmad W., Younas H., Tariq M., Irfan M., Altaf K. (2024). Effect of ascorbic acid in mitigating copper stress in pea (*Pisum sativum* L.). *Biological and Clinical Sciences Research Journal*. https://doi.org/10.54112/bcsrj.v2024i1.1444
2. Chaoui A., Ferjani E. (2004). Effects of cadmium and copper on antioxidant capacities, lignification and auxin degradation in leaves of pea (*Pisum sativum* L.) seedlings. *Comptes Rendus Biologies*. 328 1, 23-31. https://doi.org/10.1016/j.crvi.2004.10.001
3. Chaoui A., Jarrar B., Ferjani E. (2004). Effects of cadmium and copper on peroxidase, NADH oxidase and IAA oxidase activities in cell wall, soluble and microsomal membrane fractions of pea roots. *Journal of Plant Physiology*, 161 11, 1225-34. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.02.002
4. Chitra K. (2017). Effects of Copper on germination and seedling growth of radish (*Raphanus sativus* L.). *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology,* 11, 01-02. https://doi.org/10.9790/2402-1104010102
5. Lin J., Jiang W., Liu D. (2002). Accumulation of copper by roots, hypocotyls, cotyledons and leaves of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Bioresource Technology*, 86 2, 151-5. https://doi.org/10.1016/s0960-8524(02)00152-9