

## ВПЛИВ КРИТИЧНОГО НАДЛИШКУ МІКРОЕЛЕМЕНТІВ НА РОЗВИТОК КУЛЬТУРИ ЯЧМІНЬ (*HORDEUM*)

Т.М. Єгорова, Н.А. Корнілова, О.І. Мінералов

*Інститут агроекології і природокористування НААН (м. Київ, Україна)*

*e-mail: egorova\_geochem@ukr.net; ORCID: 0000-0003-2148-7738*

*e-mail: nina.kornilova.68@ukr.net*

*e-mail: mineralovo@gmail.com*

*Викладено аспекти екологічної небезпеки дисбалансу поживних мікроелементів у системі ґрунт–рослина. Зазначено, що надкритичне надходження поживних елементів на посіви сільськогосподарських культур здатні супроводжувати різні надзвичайні ситуації і техногенні катастрофи, включаючи військові, хімічні та пірогенні. Наведено основні ознаки токсичного впливу надлишку мікроелементів на зернові культури та зазначено позитивний лінійний кореляційний зв'язок між забрудненням ґрунту й зниженням урожайності зернових культур. Представлено мету, задачі, а також основні умови вегетаційного лабораторного дослідження з вирощування ячменю (*Hordeum*) сорту Віраж на субстраті ґрунтосуміші «Green Line». Особливість досліджень полягає у вивченні впливу моноелементних надкритичних концентрацій Zn, Cu, Mo в умовах кореневого та позакореневого живлення за вирощування ячменю. Досліджено 7 експериментальних вегетаційних схем ґрунт–рослина із застосуванням підкореневого і позакореневого їх надходження. За результатами 57-денного дослідження визначено кількісні параметри вилягання культури, морфології листкового апарату та кореневої системи. Описано особливості розвитку рослин при надкритичних рівнях надходження мікроелементів та їх відхилення від умов контрольних рослин із незначним біогеохімічним надлишком Zn, Cu, Mo у ґрунтосуміші. Встановлено, що для кореневої системи ячменю та вилягання його паростків найбільшу небезпеку має надкритичне надходження молібдену, яке збільшило вилягання паростків у 4–5 разів та знизило розвиток і довжину кореневої системи до 2-х разів. Для листкової пластини паростків ячменю найбільшу небезпеку становить надкритичне позакореневе надходження цинку, яке зменшило висоту паростків у 1,2 раза, а довжину листкової пластини у 1,4 раза. Зроблено висновки, що відмінності культур у потребі Mo, Zn, Cu впливають на особливості їх реакції на токсичні концентрації поживних елементів у системі живлення. Запропоновано застосовувати оцінки рівнів техногенно забруднених територій важкими металами і мікроелементами за підготовки територій до сільськогосподарської діяльності в сучасних антропогенних умовах.*

**Ключові слова:** *вегетаційний дослід, цинк, мідь, свинець, надкритичний надлишок.*

### ВСТУП

Забезпеченість сільськогосподарських культур поживними мікроелементами є традиційною проблемою сільськогосподарської галузі. Більшість науково-практичних досліджень ґрунтів зорієнтовані на проблему нестачі мікроелементів у ґрунтах та її вплив на фітопатології різних культур. Різноміфакторна деградація ґрунтів у комплексі із зниженням вмісту гумусу створюють стійке серед аграріїв уявлення про необхідність постійного підживлення ґрунтів поживними елементами для формування

високих урожаїв. Такий підхід дійсно здатен запобігати фізико-хімічній деградації ґрунту та розвитку широкої низки захворювань культур в умовах нестачі у ґрунтах відповідних елементів живлення. Разом із тим, теорія і практика біогеохімії активно свідчить про актуальність дотримання граничних рівнів поживних мікроелементів як умови нормального гомеостазу рослин та споживачів сільськогосподарської продукції [1; 2]. Надлишкові концентрації хімічних елементів у ґрунтах, що перевищують гранично допустимі рівні прийнято розглядати як чинник екологічної небезпеки

забруднення важкими металами, що здатне знижувати якість продукції рослинництва. Надкритичні концентрації поживних елементів у ґрунтах і рослинах аграрна наука розглядає як забруднення угідь важкими металами. Їх вплив на розвиток культур є недостатньо дослідженими. Водночас, надкритичні надходження поживних елементів на посіви сільськогосподарських культур здатні супроводжувати різні надзвичайні ситуації і техногенні катастрофи, включаючи військові, хімічні і пірогенні. Це створює для вегетації сільськогосподарських культур умови хімічного забруднення системи ґрунт–рослина тим чи іншим хімічним елементом.

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Такі дослідження традиційно здійснюють із вивченням наслідків забруднення ґрунтів свинцем, кадмієм, цезієм, біологічна роль яких у рослині набагато нижче, ніж елементів поживних. Поживні мікроелементи підтримують різноманітні фізіологічні функції рослин і тому їх переміщення з ґрунту у рослину і далі по рослині проходить активним метаболічним шляхом [1; 3]. В умовах забруднення ґрунту великою (надкритичною) кількістю металів, деяка їх частина здатна обмінати захисні системи рослин і токсично впливати на них. Основні ознаки токсичного впливу поживних мікроелементів на культури не мають специфічних характеристик і проявляються переважно в зниженні схожості насіння, уповільненому зростанні, ненормальному розвитку кореневих систем, хлорозі, в'яненні, загибелі рослин. Ю.В. Самусенко встановлено, що для продукції рослинництва концентрації елементів у ґрунті, за яких з'являються ознаки фітотоксичності, значно перевищують ГДК [3]. Найбільш глибоко ці процеси досліджено С.Г. Корсун, Н.Г. Буслаєвою, Н.І. Довбаш на сірих лісових ґрунтах за створення штучного забруднення ґрунту Zn, Pb, Cd до 100 разів вище природного фону. Було встановлено, що таке забруднення ґрунту знижує врожайність качанів кукурудзи до

22% порівняно з контролем при абсолютній парній лінійній кореляції між показниками на рівні  $r=1$  [4; 5].

Серед зернових культур, посіви ячменю (*Hordeum*) посідають одне з важливих місць на території України. Потреби цієї культури у поживних мікроелементах є різними і оцінюються як високі для міді, середні для цинку і низькі для молібдену [6]. Доволі незначна увага приділяється відмінностям впливу на вегетацію культур критично надлишкового вмісту у ґрунтах цинку, міді і молібдену. Саме цьому питанню присвячені наші дослідження.

**Метою представлених досліджень** є вивчення впливу надкритичних концентрацій поживних мікроелементів (Zn, Cu, Mo) на розвиток ячменю (*Hordeum*) сорту Віраж в умовах вегетаційного лабораторного дослідю.

### МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дослідження здійснено на субстраті ґрунтосуміші «Green Line» з вирощуванням культури ячмінь сорту Віраж. Обрано стандартні умови короткострокового вегетаційного лабораторного методу [7–9]. Вегетаційний метод дає можливість за необхідності змінити основні чинники життя рослин і тим самим швидше і точніше, ніж у польовому досліді, встановити шукані закономірності взаємодії рослин, ґрунту і добрив. Цей метод дає змогу детально розчленувати і виявити роль і значення окремих чинників у житті рослин при регульованих умовах вологості, освітленості, температури та поживного режиму в поєднанні з детальними хімічними, фізіологічними та іншими дослідженнями.

Дослідження включали 7 експериментальних вегетаційних схем ґрунт–рослина. Експериментальними схемами було обрано такі: контрольна, внесення надкритичних концентрацій цинку на поверхню ґрунту (кореневе) та поверхню рослин (позакореневе), внесення надкритичних концентрацій міді на поверхню ґрунту (кореневе) та рослин (позакореневе), внесення надкритичних концентрацій молібдену

на поверхню ґрунту (коренева) та рослин (позакоренева). Вивчення та порівняльний аналіз морфологічного стану культури у межах експериментальних схем проходило впродовж 57 діб з 25.06.2021 по 20.08.2021.

Для дослідження кожної із схем у три горщики висаджено 12 зерен ячменю сорту Віраж після триденного їх замочування. Умови вегетаційної кімнати: температура 25°C, вологість 70%, світловий день тривав 12 год, інтенсивність освітлення становила 10 000 люксів, шкідників виявлено не було. *Коренева внесення надкритичних концентрацій* проводилось шляхом поливу ґрунту (2 рази на тиждень), *позакоренева внесення* — шляхом обприскування паростків (2 рази на тиждень). Для поливу ґрунту і обприскування паростків застосовувались три окремі розчини у дистильованій воді, зокрема із вмістом  $Zn=26,2$  г/дм<sup>3</sup>,  $Cu=34,6$  та  $Mo=13,2$  г/дм<sup>3</sup>, що перевищують гранично допустимі концентрації у водах питного та побічного застосування [10] від 5 200 до 175 000 разів (виконавець О.І. Мінералов).

Опис морфології паростків здійснювався на 16 (10.07.2021 р.) та 57 (20.08.2021) добу дослідів; опис та заміри кореневої системи проходили по завершенні дослідів на 57-му добу (виконавець Н.А. Корнілова).

## РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Вміст поживних мікроелементів у субстраті, за даними виробника становив у рухомій формі:  $Zn - 5$  мг/кг,  $Cu - 10$ ,  $Mo - 19$ , а також  $Mn - 25$ ,  $Fe - 46$  мг/кг. Ці цифри відносно ГДК у рухомій формі ґрунту для досліджених поживних мікроелементів становлять, відповідно, 0,2–3,0 – 63,0 ГДК. Відносно порогових біогеохімічних рівнів мікроелементів у ґрунтах за В.В. Івановим [9], їх вміст перевищує верхні порогові концентрації у 2–3 рази, що відповідає незначному надлишковому рівню у ґрунтосуміші  $Zn$ ,  $Cu$ ,  $Mo$ . Результати морфологічних характеристик ячменю сорту Віраж у межах семи експериментальних вегетаційних схем ґрунт–рослина на 57-й день дослідів узагальнено у *табл.*

**Морфологічні характеристики ячменю сорту Віраж у межах вегетаційних схем надкритичного внесення мікроелементів у систему ґрунт–рослина (усереднені оцінки)**

| Веgetаційна схема ґрунт–рослина | Мікроелементи у надкритичних концентраціях |                       | Виявлення рослин, % | Висота паростків, см | Колір листків                           | Довжина і ширина листків, см | Максимальна довжина кореня, см |
|---------------------------------|--|-----------------------|---------------------|----------------------|---|------------------------------|--------------------------------|
|                                 | коренева внесення                          | позакоренева внесення |                     |                      |   |                              |                                |
| Контроль                        | Відсутні                                   |                       | 25                  | 27,3 (11)*           | Яскраво-зелений                         | 23,5 (7) – 0,5 (0,3)         | 13,2                           |
|                                 |  | Відсутні              | 20                  | 29,1                 | Яскраво-зелений                         | 23,7–0,5                     | 13,0                           |
| Надкритичне внесення цинку      | Zn   | Відсутні              | 89                  | 29,0                 | Світло- та жовтувато-зелений            | 24,2–0,5                     | 12,7                           |
|                                 | Відсутні                                   | Zn                    | 80                  | 23,8                 | Зелений                                 | 17,0–0,5                     | 14,6                           |
| Надкритичне внесення міді       | Cu   | Відсутні              | 65                  | 26,9                 | Зелений                                 | 21,0–0,3                     | 11,3                           |
|                                 | Відсутні                                   | Cu                    | 75                  | 28,0                 | Зелений                                 | 20,2–0,5                     | 11,6                           |
| Надкритичне внесення молибдену  | Mo   | Відсутні              | 95                  | 24,3                 | Зелений у верхніх і жовтуватий у нижніх | 19,7–0,3                     | 7,4                            |
|                                 | Відсутні                                   | Mo                    | 100                 | 29,0                 | Зелений                                 | 21,9–0,5                     | 11,6                           |

Примітка: \* у дужках цифри на 16 день дослідів.

**Контрольний дослід системи ґрунт-рослина** характеризує незначний надлишок у ґрунтосуміші Zn, Cu, Mo та 94,4% схожість ячменю через 5 діб. Морфологію паростків на 16 день дослідів характеризували яскраво-зелений колір, висота 10–12 см, стебла мали по 2 листки завдовжки 6–8 см та ширині 0,3 см. По завершенні дослідів (57 день) в умовах кореневого поливу за схожості рослин 100%, вилягання становило лише 25%; морфологію паростків по завершенні дослідів визначають висоту стебла 23,5–31,0 см (середнє 27,3 см), 5–7 листків яскраво-зеленого кольору завдовжки 18,4–28,6 см (середнє 23,5 см) та ширині 0,5 см; корінь мав мичкувату структуру із найбільшою довжиною 13,0–13,4 см (середнє 13,2 см). В умовах позакореневого поливу схожість рослин сягала 100%, а їх вилягання 20%; морфологію паростків по завершенні дослідів визначають висота стебла 27,0–31,2 см (середнє 29,1 см), 6–7 листків яскраво-зеленого кольору завдовжки 21,3–26,0 см (середнє 23,7 см) та ширині 0,5 см; корінь мав мичкувату структуру із найбільшою довжиною 12,4–13,6 см (середнє 13,0 см).

**Внесення надкритичних концентрацій цинку на поверхню ґрунту (кореневе внесення) та рослини (позакореневе)** характеризує полив ґрунтосуміші та сходів розчином із концентрацією цинку 26,2 г/л. В умовах кореневого внесення схожість рослин становила 100%, а вилягання 89%; морфологію паростків по завершенні дослідів визначають висота стебла 27,9–29,8 см (середнє 29,0 см), 6–7 листків світло- (або жовтуватого) зеленого кольору верхніх листків та жовтий у нижнього при їх довжині 24,2–23,8 см (середнє 24,2 см) та шириною 0,5 см; корінь мав мичкувату структуру із найбільшою довжиною 10,0–16,4 см (середнє 12,7 см). В умовах позакореневого внесення схожість рослин становила 100%, вилягання 80%; морфологію паростків по завершенні дослідів визначають висоту стебла 21,8–25,6 см (середнє 23,8 см), 6–8 листків зеленого кольору за їх довжини 15,2–18,5 см (середнє 17,0 см) та ширині 0,5 см; корінь мав мичкувату струк-

туру із найбільшою довжиною 10,5–18,6 см (середнє 14,6 см).

Таким чином, надходження цинку на поверхню ґрунту пригнічує відносний розвиток кореневої системи у 1,2 раза та сприяє збільшенню висоти паростків і довжини листків; надходження на поверхню рослини – навпаки, пригнічує розвиток листового апарату ячменю у 1,4 раза та сприяє розвитку кореневої системи.

**Внесення надкритичних концентрацій міді на поверхню ґрунту (кореневе внесення) та рослини (позакореневе)** характеризує полив ґрунтосуміші та сходів ячменю розчином із концентрацією міді 34,6 г/л. В умовах кореневого внесення схожість рослин становила 100%, а вилягання 65%; морфологію паростків по завершенні дослідів визначають висоту стебла 22,0–31,0 см (середнє 26,9 см), 7 листків зеленого кольору за їх довжини 17,4–23,5 см (середнє 21,0 см) та ширині 0,3 см; корінь мав мичкувату структуру із найбільшою довжиною 10,4–12,2 см (середнє 11,3 см). В умовах кореневого внесення схожість рослин становила 100%, вилягання 75%; морфологію паростків по завершенні дослідів визначають висота стебла 25,2–29,5 см (середнє 28,0 см), 6 листків зеленого кольору при їх довжині 16,4–24,2 см (середнє 20,2 см) та ширині 0,5 см; корінь мав мичкувату структуру із найбільшою довжиною 10,5–12,4 см (середнє 11,6 см).

Таким чином, надходження міді на поверхню ґрунту вкрай незначно пригнічує відносний розвиток кореневої системи та висоту паростків; надходження на поверхню рослини – навпаки, незначно пригнічує розвиток листового апарату та не змінює кореневу систему дослідженої культури ячмінь.

**Внесення надкритичних концентрацій молібдену на поверхню ґрунту (кореневе внесення) та рослини (позакореневе)** характеризує полив ґрунтосуміші і сходів розчином із концентрацією молібдену 13,2 г/л. В умовах кореневого внесення схожість рослин становила 100%, а вилягання 95%; морфологію паростків по завер-

шенні досліді визначають висота стебла 23,2–25,3 см (середнє 24,3 см), 5–7 листків кольору зеленого (у верхніх) та жовтого (у нижніх) за їх довжини 19,2–20,3 см (середнє 19,7 см) та ширині 0,3 см; корінь мав мичкувату структуру із найбільшою довжиною 6,0–9,2 см (середнє 7,4 см). В умовах позакореневого внесення схожість і вилягання становили 100%; морфологію паростків по завершенні досліді визначають висота стебла 28,0,8–30,1 см (середнє 29,0 см), 7–8 листків зеленого кольору при їх довжині 20,0–24,2 см (середнє 21,9 см) та ширині 0,5 см; корінь мав мичкувату структуру із найбільшою довжиною 11,2–12,4 см (середнє 11,6 см).

Таким чином, надходження молібдену на поверхню ґрунту найбільш пригнічує відносний розвиток кореневої системи (у 1,4 раза), а також ріст стебла та листового апарату у 1,1–1,2 раза; надходження молібдену на поверхню культури ячменю є менш шкідливе ніж у ґрунт.

## ВИСНОВКИ

Проведені експериментальні дослідження засвідчили, що для кореневої системи ячменю та вилягання його паростків найбільшу небезпеку має надкритичне надходження молібдену, яке збільшило вилягання паростків у 4–5 разів та знизило розвиток і довжину кореневої системи до двох разів порівняно з контролем. Для листової пластини паростків ячменю найбільшу небезпеку становить надкритичне надходження цинку в умовах позакореневого надходження, яке зменшило висоту паростків у 1,2 раза, а довжину листової пластини у 1,4 раза. Отримані результати певною мірою пояснюють відмінності у потребі Mo, Zn, Cu для вирощування культури ячменю. Таким чином, оцінка рівнів техногенно забруднених територій важкими металами і мікроелементами має бути невід’ємною складовою підготовки територій до сільськогосподарської діяльності в будь-яких умовах антропогенних змін.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Єгорова Т.М. Екологічна геохімія агроландшафтів України: моногр. / за ред. О.І. Фурдичка. Київ: «ДІА», 2018. 264 с.
2. Єгорова Т.М. Біогеохімічні пріоритети агро-екологічних досліджень. *Агроекологічний журнал*. 2017. № 1. С. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2017.174214>
3. Самусенко Ю.В. Вплив важких металів на врожайність сільськогосподарських культур. URL: <https://superagronom.com/blog/494-vpliv-vajkih-metaliv-na-vroжайnist-silskogospodarskih-kultur>
4. Корсун С.М., Буслаєва Н.Г., Довбаш Н.І. Особливості фотосинтетичної діяльності посівів кукурудзи на зерно в умовах забруднення агроекотопів свинцем, кадмієм, цинком. *Вісник аграрної науки*. 2016. № 1. С. 32–36.
5. Корсун С.Г., Голодна А.В., Шляхтуров Д.С., Клименко І.І. Особливості адаптації зернобобових культур до забруднення ґрунту важкими металами. *Збірник наукових праць ННЦ «Інститут землеробства НААН»*. 2016. № 2. С. 69–79.
6. Потреба культур в мікроелементах і винесення мікроелементів. URL: <https://aidamin.com/ua/articles/potrebnosty-kulytur-v-mikroelementah-i-vynos-mikroelementov>, від 14.06.2019.
7. Грицаєнко З.М., Грицаєнко А.О., Карпенко В.П. та ін. Методи біологічних та агрохімічних досліджень рослин і ґрунтів. Київ: ЗАТ «НІЧЛАВА», 2003. 320 с.
8. Найдін П.Г. Методика полевого опыта. Москва, 1959.
9. ДСТУ 11269-1:2004. Якість ґрунту. Визначення дії забрудників на флору ґрунту. Част. 1: метод визначення інгібіторної дії на ріст коренів. [Чинний від 2005–07–01]. Вид. офіц. Київ: Держстандарт України, 2004. 14 с.
10. Экологическая геохимия элементов: справочник в 6 кн. / под ред. Э.К. Буренкова. Москва: Недра, 1994. Кн. 1. 304 с.

## REFERENCES

1. Yehorova, T.M. & Furdychko, O.I. (Ed.) (2018). *Heokhimichna ekolohiia ahrolandshafti Ukrainy: monografija [Geochemical ecology of agricultural landscapes of Ukraine: monograph]*. Kyiv: Tov «DIA» [in Ukrainian].
2. Yehorova, T.M. (2017). Bioheokhimichni pryorityety ahroekoloichnykh doslidzhen [Biogeochemical priorities of agroecological researches]. *Ahroekoloichnyi zhurnal – Agroecological journal*, 1, 28–35 [in Ukrainian].

3. Samusenko, Yu.V. *Vplyv vazhkykh metaliv na vrozhainist silskohospodarskykh kultur [Influence of heavy metals on crop yields]*. (nd.). URL: <https://superagronom.com/blog/494-vplyv-vajkih-metaliv-na-vrojainist-silskogospodarskih-kultur> [in Ukrainian].
4. Korsun, S.M., Buslaieva, N.H. & Dovbash, N.I. (2016). Osoblyvosti fotosyntetychnoi diialnosti posiviv kukurudzy na zerno v umovakh zabrudnennia ahroekotopiv svyntsem, kadmiem, tsynkom [Peculiarities of photosynthetic activity of planting corn for grain in the minds of agroecotopes fermented with lead, cadmium, zinc]. *Visnyk ahramoi nauky – Bulletin of Agrarian Science*, 1, 32–36 [in Ukrainian].
5. Korsun, S.H., Holodna, A.V., Shliakhturov, D.S. & Klymenko, I.I. (2016). Osoblyvosti adaptatsii zernobobovykh kultur do zabrudnennia hruntu vazhkymy metalamy [Features of adaptation of legumes to soil contamination by heavy metals]. *Zbirnyk naukovykh prats NNTs «Instytut zemlerobstva NAAN» – Collection of scientific works of NSC «Institute of Agriculture NAAS»*, 2, 69–79 [in Ukrainian].
6. *Potreba kultur v mikroelementakh i vnyesennia mikroelementiv [The need for crops in micronutrients and removal of micronutrients]*. (nd.). URL: <https://aidamin.com/ua/articles/potrebnosty-kulytur-v-mikroelementah-i-vynos-mikroelementov>, vid 14.06.2019 [in Ukrainian].
7. Hrytsaienko, Z.M., Hrytsaienko A.O., Karpenko, V.P. et al. (2003). *Metody biolohichnykh ta ahrokhimichnykh doslidzhen roslin i gruntiv [Methods of biological and agrochemical research of plants and soils]*. Kyiv: ZAT «NICH.LAVA» [in Ukrainian].
8. Naidyn, P.H. (1959). *Metodyka polevoho opyta [Methods of field experience]*. Moskva [in Russian].
9. Yakist hruntu. Vyznachennia dii zabrudnykiv na floru hruntu. Chastyna 1: metod vyznachennia inhibitornoi dii na rist koreniv [Soil quality. Determination of the effect of pollutants on soil flora. Part 1: method for determining the inhibitory effect on root growth]. (2005). *DSTU 11269-1:2004 from 1st Juli 2005*. Kyiv: Derzhstandart Ukrainy [in Ukrainian].
10. Burenkov, E.K. (Ed.) (1994). *Ekolohycheskaia heokhymia elementov: Spravochnyk v 6 kn. [Ecological geochemistry of elements: Handbook in 6 books]*. (Vol. 1). Moskva: Nedra [in Russian].

Стаття надійшла до редакції журналу 16.03.2022