

УДК 504.5:574.2

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.2-53.13>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЦИНКУ НА РОСТОВІ ПОКАЗНИКИ РОСЛИН-ФІТОРЕМЕДІАНТІВ

Ковров О.С., Сушко З.Л.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»  
пр. Дмитра Яворницького, 19, 49005, м. Дніпро  
kovrov.o.s@nmu.one, sushko.z.l@nmu.one

Застосування технологій фітореMediaції є перспективним напрямом в стратегіях відновлення деградованих земель, який базується на здатності певних рослин поглинати, концентрувати та метаболізувати забруднюючі речовини завдяки механізмам гіперакумуляції. Для обґрунтування способів фіторекультиваци забруднених земель і встановлення закономірностей росту рослин-фітореMediaнтів від вмісту важких металів у ґрунтах виконано лабораторні дослідження з використанням методів біотестування. Для біотестів обрано 2 тест-культури рослин-фітореMediaнтів: зернове сорго (*Sorghum bicolor*) та горох посівний (*Pisum sativum*). Для дослідження впливу цинку на ростові показники рослин використано розчин цинкового купоросу ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) для поливу з розрахунку, що 1 мл розчину містить 1 ГДК цинку у перерахуванні на 1 кг ґрунту (23 мг). Ідея експерименту полягала в тому, щоб протягом терміну експерименту (3 доби) поливати тестові рослини розчинами об'ємом  $V = 20$  мл, в яких концентрація цинку відповідає 0,5, 1, 2, 4 та 8 ГДК.

Встановлено, що найоптимальнішою концентрацією цинку в ґрунті для зернового сорго та гороху посівного є 1 ГДК, що свідчить про адекватність встановлених норм вмісту важких металів у ґрунтах зазначених у ДСанПіН 2.2.7.029-99. При даній концентрації спостерігаються найвищі показники середніх значень висоти рослин та довжини коренів. Розраховано значення фітотоксичного ефекту ростових показників рослин-фітореMediaнтів залежно від концентрацій цинку. Отримані результати свідчать, що сорго та горох можна використовувати в якості сидератів на техногенно забруднених територіях в якості заходу тимчасової фіторекультиваци з метою поліпшення структури та родючості ґрунту, збагачення його азотом та пригнічення росту рудеральної рослинності. *Ключові слова:* важкі метали, цинк, рослини-фітореMediaнти, фітотоксичний ефект.

### Study of the influence of zinc on the growth indicators of phytoremediation plants. Kovrov O., Sushko Z.

The application of phytoremediation technologies is a promising direction in strategies for the restoration of degraded lands, which is based on the ability of certain plants to absorb, concentrate and metabolize pollutants due to hyperaccumulation mechanisms. In order to substantiate the methods of phytoremediation of contaminated lands and establish the growth patterns of phytoremediation plants from the content of heavy metals in soils, laboratory studies using biotesting methods were performed. For biotests, 2 test cultures of phytoremediation plants were chosen: grain sorghum (*Sorghum bicolor*) and field pea (*Pisum sativum*). To study the influence of zinc on plant growth indicators, a solution of zinc sulfate ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) was used for watering, assuming that 1 ml of the solution contains 1 MPC of zinc per 1 kg of soil (23 mg). The idea of the experiment was to water the test plants with solutions of volume  $V = 20$  ml, in which the concentration of zinc corresponds to 0.5, 1, 2, 4 and 8 MPC, during the experiment period (3 days).

It was established that the most optimal concentration of zinc in the soil for grain sorghum and field peas is 1 MPC, which indicates the adequacy of the established standards for the content of heavy metals in soils specified in DSanPiN 2.2.7.029-99. At this concentration, the highest average values of plant height and root length are observed. The value of the phytotoxic effect of growth indicators of phytoremediation plants was calculated depending on zinc concentrations. The obtained results indicate that sorghum and peas can be used as siderates in technogenically polluted territories as a measure of temporary phytoremediation in order to improve the structure and fertility of the soil, enrich it with nitrogen and suppress the growth of ruderal vegetation. *Key words:* heavy metals, zinc, phytoremediation plants, phytotoxic effect.

**Постановка проблеми.** В сучасному світі важкі метали є одними з найбільших токсичних та найпоширеніших антропогенних забруднювачів довкілля, а зокрема ґрунтового покриву. Вони присутні в усіх рівнях екологічної піраміди. Через ґрунтовий покрив та рослини в організм людини потрапляє близько 40-80 % важких металів, коли через воду та повітря – 20-40 %. Через накопичення в організмі людини, вони порушують обмін речовин, нормальну роботу систем і органів, провокують хвороби та навіть викликають рак і мутації. Цинк є найважливішим та другим за кількістю мікроелементом в організмі людини, проте його надлишок є шкідливим та

небезпечним. Рослини-гіперакумулятори мають унікальні властивості щодо поглинання і накопичення важких металів в біомасі, що є найбільш перспективним вирішенням проблеми міграції важких металів та необхідним для збереження природного балансу екосистем. Застосування технологій фітореMediaції для забруднених територій є перспективним в стратегіях відновлення деградованих земель з метою їх подальшого раціонального використання. Для виявлення гіперакумуляційних властивостей і встановлення закономірностей накопичення важких металів в рослинах необхідно виконати низку лабораторних досліджень з використанням методів біотестування.

**Актуальність дослідження.** Грунти є основним середовищем для міграції і накопичення важких металів. Вони потрапляють туди у різних формах (солі розчинні/нерозчинні та оксиди) з атмосфери (дощі, вітрова ерозія), гідросфери (поверхневий стоки, підземні і підгрунтові води), а також можуть мігрувати та вторинно їх забруднювати [1].

Єдиним надійним способом вирішити проблему важких металів в довкіллі є фітореMediaція, яка полягає в здатності певних рослин поглинати, концентрувати та метаболізувати забруднюючі речовини через унікальні біологічні механізми гіперакумуляції, іммобілізації, деградації та ін.

Для обґрунтування технологій фітореMediaції і їх ефективного використання на деградованих територіях і забруднених ґрунтах необхідно попереднє виконання лабораторних біотестових досліджень, що дозволить правильно вибрати певні рослини-гіперакумулянти для цілеспрямованого очищення довкілля від конкретного важкого металу.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Авторами вирішена науково-практична задача зниження рівня забруднення ґрунтів цинком за допомогою гіперакумуляючих властивостей певних рослин-фітореMediaнтів. Виконані дослідження є корисною основою для обґрунтування технологій фітореMediaції забруднених і деградованих ґрунтів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Мобілізація важких металів людиною шляхом розробки родовищ корисних копалин та процесінгу мінеральних руд призводить до вивільнення цих елементів у навколишнє середовище. Оскільки важкі метали не розкладаються, вони накопичуються в навколишньому середовищі і згодом забруднюють харчові ланцюги екосистем. Це забруднення становить небезпеку для навколишнього середовища та здоров'я людей [2].

Площа забруднених чи технічно змінених земель в світі швидко зростає та наразі складає 1,9 млрд га. Даними темпами кількість деградованих земель в світі до 2050 року сягне 90 % [3].

В Україні площа порушених територій ґрунтового покриву десь 15 млн га та ще 24 млн тон гумусу втрачається щорічно. Серед основних проблем – втрата гумусу, переущільнення, замулення, ерозія, забруднення важкими металами, пестицидами, радіонуклідами (цезієм, стронцієм для розпаду яких необхідно близько 300 років) та інші.

У 18 містах України середньорічні концентрації важких металів перевищують ГДК (1,1-11,2), серед них Дніпро, міста Донецької та Київської областей [4].

Значний вміст важких металів у ґрунтах, зокрема цинку, негативно впливає на стан природних екосистем, що може спричинити порушення фізіологічних та біохімічних процесів, які відбуваються у живих організмах [5].

Експериментальні дослідження показують, що цинк достатньо швидко накопичується у ґрунтах і воді та дуже повільно виводиться з них. При надходженні його на поверхню ґрунту він накопичується у ґрунтовій товщі, особливо у верхніх гумусових горизонтах, і повільно видаляється завдяки ерозії, рослинам та вилугуванню [6].

Надкритичне надходження поживних елементів, зокрема цинку, на посіви сільськогосподарських культур здатні супроводжувати різні надзвичайні ситуації і порушення екологічної рівноваги [7].

Проте, є рослини, які акумулюють надмірні концентрації цинку: талабан альпійський (*Thlaspi caerulescens*) – 52 000 мг/кг сухої маси, а також рослини сімейства Гвоздичні (*Caryophyllaceae*) – до 1 500-4 900 мг/кг сухої маси, Хрестоцвітні (*Brassicaceae*) – до 5 400-13 630 мг/кг, Злакові (*Violaceae*) та Кермекові (*Plumbaginaceae*) [8].

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** В роботі представлено результати лабораторних досліджень впливу цинку на ростові-показники рослин-фітореMediaнтів для обґрунтування технологій фітореMediaції забруднених земель.

**Новизна.** Виконано низку біотестів з рослинами-фітореMediaнтами та розраховано фітотоксичний ефект залежно від концентрацій цинку в ґрунті.

**Методологічне або загальнонаукове значення** полягає в обґрунтуванні доцільності застосування сорго звичайного (*Sorghum bicolor*) та гороху посівного (*Pisum sativum*) в якості рослин-фітореMediaнтів на ґрунтах, забруднених цинком.

**Викладення основного матеріалу.** Проблема забруднення важкими металами стає більш серйозною зі збільшенням темпів індустріалізації та різноманітних впливів на природні біогеохімічні цикли. На відміну від органічних речовин, важкі метали по суті є небіодеградуєчими і тому накопичуються у навколишньому середовищі. Накопичення важких металів у ґрунтах та природних водах становить небезпеку для навколишнього середовища та здоров'я людини. Ці елементи по ланцюгам живлення накопичуються в тканинах живих організмів і внаслідок біокумуляції їх концентрація зростає при переході з нижчого трофічного рівня на більш високій. У ґрунті важкі метали чинять токсичну дію на ґрунтову біоту зокрема мікроорганізми, що суттєво впливає на біопродуктивність екосистеми в цілому.

ФітореMediaція є сучасною екотехнологією, яка базується на використанні рослин та пов'язаних з ними ґрунтових мікроорганізмів для зменшення концентрації або токсичного впливу важких металів у довкіллі.

Основні переваги фітореMediaції пов'язані з екологічно прийнятними і економічно доцільними способами вирішення екологічних проблем забруднення ґрунтів з перспективою їх відновлення до стану природних екосистем. ФітореMediaція за допомогою

певних рослин сприяє створенню піонерних рослинних угруповань, які дають потенціал для відновлення деградованих територій [9].

Піонерні угруповання формують первинну сукцесію порушеного біоценозу, частіше нерівномірну та без взаємодії між різними видами. Невибагливі до родючості ґрунту, рівня вологості та наявності поживних речовин, морозостійкі, вітрозапильні (насіння легко втримується на поверхні), мають швидкі ростові показники та велику кількість насіння, також полюють високу освітленість, тому легко ростуть на відкритих ділянках [10].

Для фітореMediaції найкраще та частіше використовують багаторічні трав'янисті рослини, які швидко розвивають біомасу та мають значну толерантність до важких металів, зокрема рослини сімейства Злаків. Разом з фітореMediaнтами доцільно використовувати сидеральні культури, які садять з метою відновлення чи покращення стану ґрунтів, наприклад рослини сімейства Бобових.

Кожна рослина здатна поглинати певний забруднювач у більшій, або меншій концентрації. Тому при виборі рослин для фітореMediaції, необхідно звернути увагу, які саме речовини вона поглинає.

Звичайне сорго (*Sorghum bicolor*) – трав'яниста одно- чи багаторічна рослина родини Злакових (*Poaceae*). Висота рослини сягає від 0,5 до 7 м. Має потужну біомасу та розвинену кореневу систему глибиною 2-2,5 м. Не потребує добрив для розвитку і пригнічує ріст бур'янів. Сорго використовують як харчову та промислову культуру, а також для вирішення екологічних проблем пов'язаних з фітореMediaцією ґрунтів, захисту від ерозії, збереження структури ґрунтового покриву.

Горох посівний (*Pisum sativum*) – трав'яниста однорічна квіткова самозапильна рослина родини Бобових (*Fabaceae*), використовується як зернобобова. Висота рослин сягає від 50 см до 2,5 м. Переваги використання гороху є невибагливість до умов культивування, можливість росту на засолених ґрунтах, збагачення ґрунту азотом завдяки розвиненій ризосфері. Горох використовують в основному як харчову культуру, а також як сидерат для покращення властивостей ґрунту і для фітореMediaції земель. Він має швидкий ріст, достатньо велику та розлогу біомасу, добре комбінується зі злаками [8].

**Ростовий тест рослин-фітореMediaнтів.** Для обґрунтування способів фітореMediaції забруднених земель і встановлення закономірностей росту рослин-фітореMediaнтів від вмісту важких металів у ґрунтах виконано лабораторні дослідження з використанням методів біотестування.

Ростовий тест складається з обліку змін ростових показників досліджуваної культури, зокрема довжини надземної частини та коріння, вирощеної на індикаторних зразках ґрунту. Тривалість експерименту – 3 тижні.

Для біотестів обрано 2 тест-культури рослин-фітореMediaнтів: зернове сорго (*Sorghum bicolor*) та

горох посівний (*Pisum sativum*). В якості модифікатора забруднення ґрунту цинковий купорос ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ).

Для біотестових експериментів використовували цинковий купорос ( $ZnSO_4$ ), який в певних концентраціях позитивно впливає на процес росту, розвитку та врожайності сільськогосподарських рослин. При потраплянні в ґрунтовий покрив  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$  розпадається на катіон –  $Zn^{2+}$  та аніон –  $SO_4^{2-}$ .

Тестові рослини пророщували у спеціальних лотках для пророщування розсади з ємностями для ґрунту об'ємом 200 дм<sup>3</sup>. Посадка кожної з тестових рослин здійснювалось у 6 ємностей лотка з підготовленою ґрунтовою сумішшю. Загалом використано 12 ємностей, 6 – для насіння зернового сорго, 6 – для гороху посівного. В кожну з 12 тестових ємностей об'ємом 200 дм<sup>3</sup> кожна (по 6 ємностей для 2 тест-культур рослин-фітореMediaнтів) насипали підготовлений ґрунт по 50 г, додавали по 20 мл води в кожну та розміщували в місці з гарним освітленням на весь час тривалості експерименту. В чашках Петрі наливали 30 мл води та замочували 120-180 насінин обраних рослин-фітореMediaнтів (рис. 1).

Після замочування насіння висаджували в підготовлений ґрунт по 20-30 насінин рослин-фітореMediaнтів (в залежності від розміру): зернове сорго – 30 насінин (загалом 180 насінин), горох посівний – 20 насінин (загалом 120 насінин). Для створення парникового ефекту ємності з розсадою накривали харчовою плівкою до появи паростків. Необхідною умовою для проведення даного дослідження є підтримка достатньої вологості для проростання насінин.

Для дослідження впливу цинку на ростові показники рослин використано розчин цинкового купоросу ( $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ ) для поливу з розрахунку, що 1 мл розчину містить 1 ГДК цинку у перерахуванні на 1 кг ґрунту (23 мг).

Ідея експерименту полягала в тому, щоб протягом терміну експерименту (3 доби) поливати тестові рослини розчинами об'ємом  $V = 20$  мл, в яких концентрація цинку відповідає 0,5, 1, 2, 4 та 8 ГДК. Рослини в контрольних ємностях поливали тільки чистою водою. Схема поливу тестових ємностей з рослинами наведено на рис. 2.

Об'єм одноразового поливу розчином цинкового купоросу становить 20 мл на кожну ємність. Періодичність поливу – 1 раз через добу.

По закінченні експерименту зразки рослин акуратно виймали з кожної ємності лотка та вимірювали за допомогою лінійки довжину кореневої і надземної частини паростків. Використовуючи дані експерименту розраховано середньо арифметичні висоти рослин і довжини корінців, середньо арифметичне відхилення та дисперсію, для кожної концентрації цинку в ємностях рослин-фітореMediaнтів за результатами вимірів. Результати розрахунків показників зведено у табл. 1 і 2.

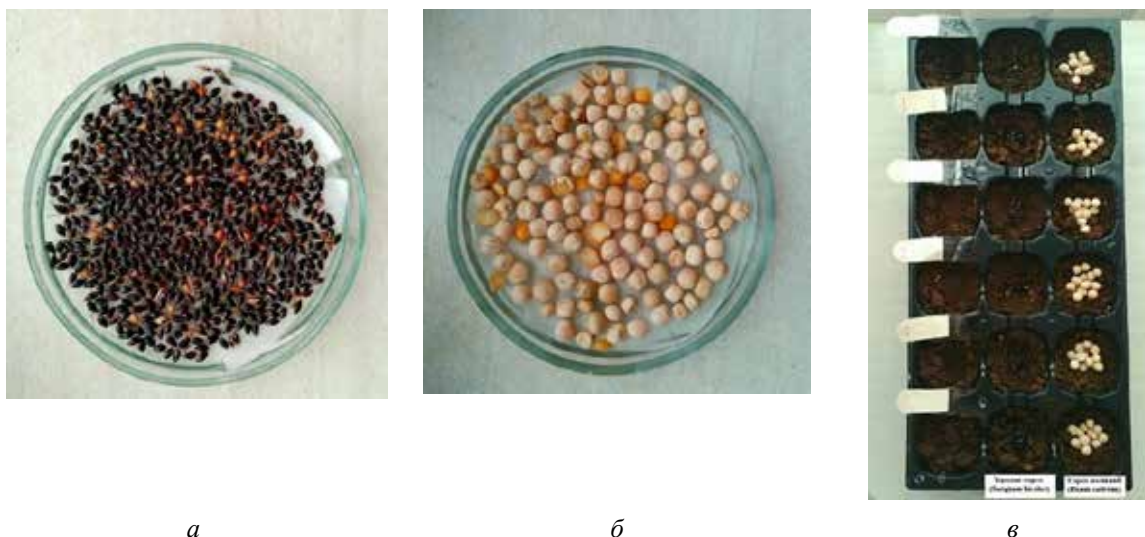


Рис. 1. Підготовка насіння рослин та ємностей з ґрунтовою сумішшю:  
а – зернове сорго; б – горох посівний; в – ємність для висадки насіння рослин

	Зернове сорго ( <i>Sorghum bicolor</i> )	Горох посівний ( <i>Pisum sativum</i> )
С – контроль – 20 мл чистої води		
1 – 0,5 ГДК – 0,5 мл розчину ZnSO <sub>4</sub> + 19,5 мл чистої води		
2 – 1 ГДК – 1 мл розчину ZnSO <sub>4</sub> + 19,0 мл чистої води		
3 – 2 ГДК – 2 мл розчину ZnSO <sub>4</sub> + 18,0 мл чистої води		
4 – 4 ГДК – 4 мл розчину ZnSO <sub>4</sub> + 16,0 мл чистої води		
5 – 8 ГДК – 8 мл розчину ZnSO <sub>4</sub> + 12,0 мл чистої води		

Рис. 2. Схема поливу рослин розчином ZnSO<sub>4</sub>\*7H<sub>2</sub>O

На рис. 4-5 представлено результати статистичного аналізу ростового тесту (середнє значення, дисперсія, стандартне відхилення) для рослин-фіторемедіантів залежно від поглинання цинку.

Встановлено, що найоптимальніші показники висоти рослин та довжини коренів отримані при концентрації цинку в 1 ГДК. Слід відзначити, що у ємностях з концентрацією 0,5 ГДК ріст рослин краще порівняно з контролем, що свідчить про стимулюючий ефект цинку у невеликих концентраціях.

Фітотоксичний ефект у % від впливу різних концентрацій цинку на ростові показники тестових рослин визначається за результатами вимі-

рювань довжини коренів та надземної частини рослин-фіторемедіантів:

$$\Phi E = \frac{M_o - M_x}{M_o} * 100, \% \quad (1)$$

де  $M_o$  – значення обраного параметра рослини з посуду із контрольним розчином (в даному випадку – вода);

$M_x$  – значення обраного параметра рослини з ємності з певною концентрацією цинку [11].

Результати розрахунків фітотоксичного ефекту ростових показників обраних рослин наведено у табл. 3.

На рис. 6 показано, що найбільший фітотоксичний ефект від цинку за довжиною надземної частини рослин спостерігається при перевищенні ГДК цинку в 8 раз (зернове сорго – 60,30 %, горох посівний – 60,47 %), а найменший – при 1 ГДК цинку (зернове сорго – -32,85 %, горох посівний – -42,94 %).

Найбільший фітотоксичний ефект від цинку за довжиною коренів (рис. 7) спостерігається при перевищенні ГДК цинку в 8 раз (зернове сорго – 46,54 %, горох посівний – 56,29 %), а найменший – при 1 ГДК цинку (зернове сорго – -39,63 %, горох посівний – 5,62 %).

Таким чином, найоптимальнішою концентрацією цинку в ґрунті для зернового сорго та гороху посівного є 1 ГДК, що свідчить про адекватність встановлених норм вмісту важких металів у ґрунтах зазначених у ДСанПіН 2.2.7.029-99 [12]. При даній концентрації спостерігаються найвищі показники середніх значень висоти рослин та довжини коренів. При 0,5 ГДК, Контроль та 2 ГДК спостерігається вже менший об'єм біомаси, як наземної, так кореневої частини.

При 4 ГДК вже ростові показники рослин-фіторемедіантів зменшилися більше ніж в 2 рази. А при



Рис. 3. Динаміка росту рослин-фіторемедіантів протягом експерименту:  
а – 3 дні; б – 10 діб; в – 15 діб; г – 21 доба

Таблиця 1

Середні значення ростових показників для *Sorghum bicolor*

Тестова ємність	Показник	$\bar{x} \pm m$	$\sigma^2$
Контроль	Висота рослин, см	13,88 +/- 0,16	0,44
	Довжина коренів, см	6,51 +/- 0,07	0,08
0,5 ГДК	Висота рослин, см	14,93 +/- 0,29	1,43
	Довжина коренів, см	8,24 +/- 0,13	0,29
1 ГДК	Висота рослин, см	18,44 +/- 0,25	1,06
	Довжина коренів, см	9,09 +/- 0,15	0,38
2 ГДК	Висота рослин, см	11,03 +/- 0,12	0,25
	Довжина коренів, см	7,01 +/- 0,14	0,33
4 ГДК	Висота рослин, см	7,12 +/- 0,14	0,33
	Довжина коренів, см	5,24 +/- 0,12	0,25
8 ГДК	Висота рослин, см	5,51 +/- 0,08	0,11
	Довжина коренів, см	3,48 +/- 0,07	0,08

8 ГДК спостерігається вже зменшення висоти рослин та довжини коренів майже в 3 рази. Також при 4 ГДК та 8 ГДК рослини-фіторемедіанти поступово деградують та майже не відбувається розвиток біомаси.

**Головні висновки.** В даній роботі досліджено вплив забруднення ґрунтів цинком на ростові показ-

ники рослин-фіторемедіантів з метою їх потенційного використання в технологіях фіторемедіації деградованих земель.

Встановлено, що найоптимальнішою концентрацією цинку в ґрунті для зернового сорго та гороху посівного є 1 ГДК, що свідчить про адекватність встановлених норм вмісту важких металів у ґрунтах

Таблиця 2

Середні значення ростових показників для *Pisum sativum*

Тестова ємність	Показник	$\bar{x} \pm m$	$\sigma^2$
Контроль	Висота рослин, см	14,09 +/- 0,18	0,55
	Довжина коренів, см	8,19 +/- 0,11	0,21
0,5 ГДК	Висота рослин, см	16,84 +/- 0,18	0,55
	Довжина коренів, см	7,13 +/- 0,10	0,17
1 ГДК	Висота рослин, см	20,14 +/- 0,27	1,24
	Довжина коренів, см	7,73 +/- 0,11	0,21
2 ГДК	Висота рослин, см	16,06 +/- 0,14	0,33
	Довжина коренів, см	6,58 +/- 0,07	0,08
4 ГДК	Висота рослин, см	8,63 +/- 0,18	0,55
	Довжина коренів, см	5,71 +/- 0,10	0,17
8 ГДК	Висота рослин, см	5,57 +/- 0,07	0,08
	Довжина коренів, см	3,58 +/- 0,06	0,06

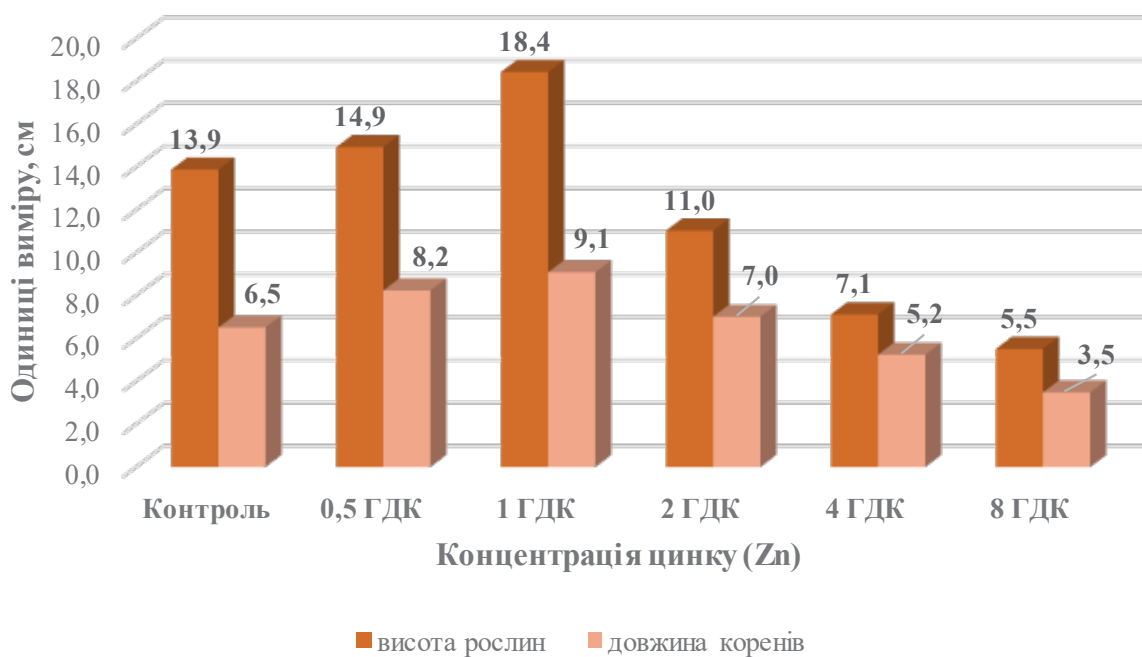


Рис. 4. Вплив концентрацій цинку на ростові показники зернового сорго

зазначених у ДСанПіН 2.2.7.029-99. При даній концентрації спостерігаються найвищі показники середніх значень висоти рослин та довжини коренів. При концентраціях цинку 0,5 ГДК, та його збільшення з 2 до 8 ГДК спостерігається зменшення об'єму біомаси, як наземної, так і кореневої частини рослин. При 4 ГДК вже ростові показники рослин-фітотоксичності зменшилися більше ніж в 2 рази. А при 8 ГДК спостерігається вже зменшення висоти рослин та довжини коренів майже у 3 рази. Також при 4 ГДК та 8 ГДК спостерігається гальмування росту біомаси у часі.

Для сорго найбільший відсоток фітотоксичного ефекту 60,3 % та 46,54 % відповідно спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 8 ГДК цинку, а найменший відсоток -32,85 % та -39,63 % спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 1 ГДК цинку. Для гороху, найбільший відсоток фітотоксичного ефекту 60,47 % та 56,29 % відповідно спостерігається для висоти рослин та довжини коренів відповідно при 8 ГДК цинку, а найменший відсоток -42,94 % та 5,62 % спостерігається для

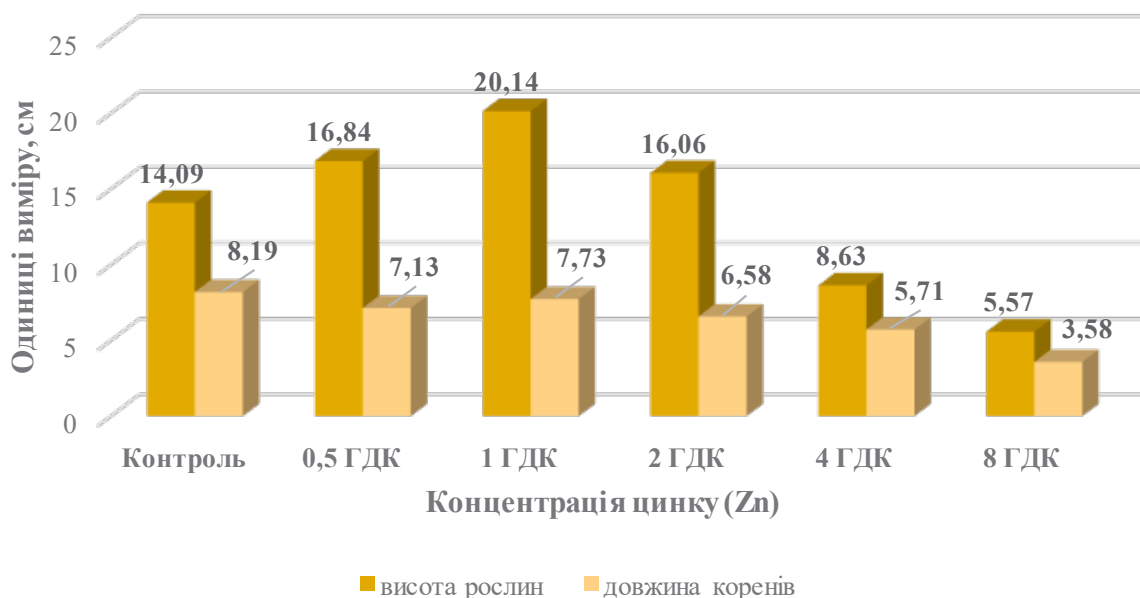


Рис. 5. Вплив концентрацій цинку на ростові показники гороху посівного

Таблиця 3

**Фітотоксичний ефект ростових показників зернового сорго та гороху посівного залежно від концентрацій цинку**

Концентрація цинку (Zn)	Параметр рослинної біомаси	Фітотоксичний ефект, %	
		Зернове сорго ( <i>Sorghum bicolor</i> )	Горох посівний ( <i>Pisum sativum</i> )
0,5 ГДК	Висота рослин	-7,56 %	-19,52 %
	Довжина коренів	-26,57 %	12,94 %
1 ГДК	Висота рослин	-32,85 %	-42,94 %
	Довжина коренів	-39,63 %	5,62 %
2 ГДК	Висота рослин	20,53 %	-13,98 %
	Довжина коренів	-7,68 %	19,66 %
4 ГДК	Висота рослин	48,70 %	38,75 %
	Довжина коренів	19,51 %	30,28 %
8 ГДК	Висота рослин	60,30 %	60,47 %
	Довжина коренів	46,54 %	56,29 %

висоти рослин та довжини коренів відповідно при 1 ГДК цинку.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Отримані результати свідчать, що сорго та горох можна використовувати в якості сидератів на техногенно забруднених територіях в якості заходу тимчасової фіторекультиваци з метою поліпшення структури та родючості ґрунту, збагачення його азотом та пригнічення росту рудеральної рослинності.

**Disclaimer.** Funded by the European Union. Views and opinions expressed are however those of the

author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Education and Culture Executive Agency (EACEA). Neither the European Union nor EACEA can be held responsible for them.

Фінансується Європейським Союзом. Однак висловлені погляди та думки належать лише авторам і не обов'язково відображають погляди Європейського Союзу чи Європейського виконавчого агентства з освіти та культури (EACEA). Ні Європейський Союз, ні орган, що надає гранти, не можуть нести за них відповідальності.

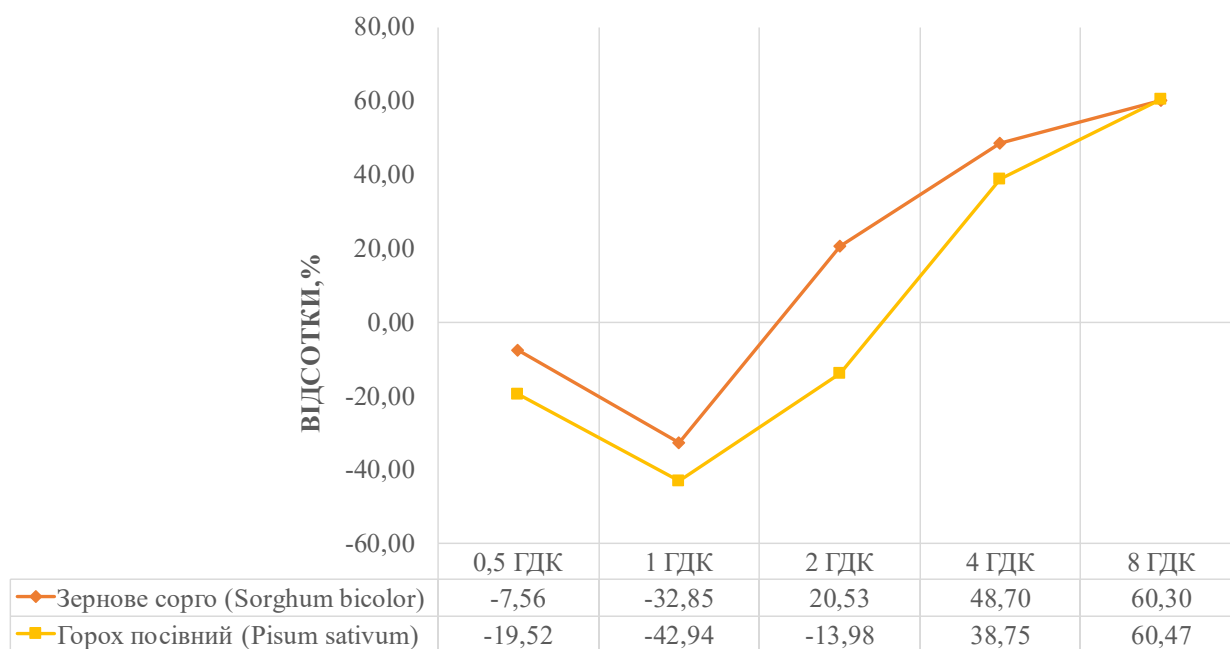


Рис. 6. Фітотоксичний ефект за висотою паростків рослин-фіторемедіантів залежно від концентрацій цинку

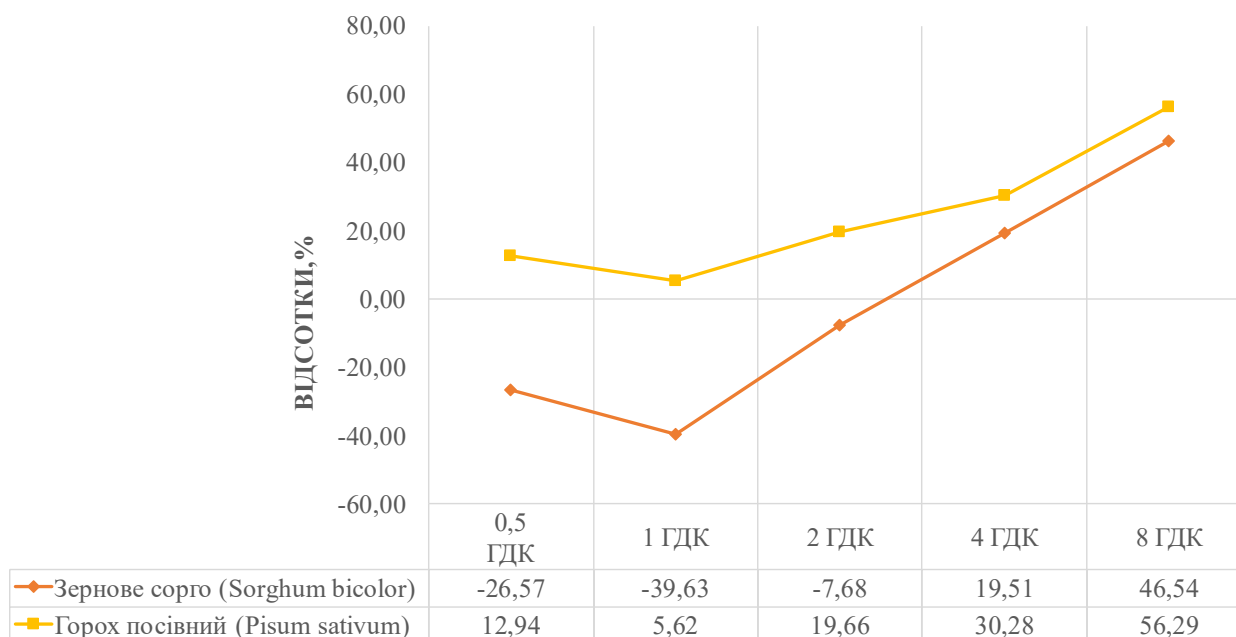


Рис. 7. Фітотоксичний ефект за довжиною коренів рослин-фіторемедіантів залежно від концентрацій цинку

### Література

1. Цицюра Я.Г., Шкагула Ю.М., Забарна Т.А., Пелех Л.В. Інноваційні підходи до фіторемедіації та фіторекультивації у сучасних системах землеробства: монографія. Вінниця: ТОВ «Друк», 2022. 1200 с.
2. Ali N., Khan E., Sajad M.A. Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications. *Chemosphere*. 2013. Vol. 91(7). P. 869-881. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2013.01.075.
3. Бобильов Ю.П., Бригадиренко В.В., Булахов В.Л. та ін. Екологія: підручник для студентів вищих навчальних закладів / за заг. ред. О.С. Пахомова. Харків: Фоліо, 2014. 666 с.
4. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Київ, 2023. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf> (дата звернення: 23.03.2024).



5. Тонха О.Л., Галімова В.М. Моніторинг важких металів у системі ґрунт-рослина-тварина в залежності від обробітку ґрунту. *Науковий вісник Національного аграрного університету*. 2005. № 81. С. 200–206.
6. Андрієвська О.А. Геохімічний огляд розподілу цинку у компонентах техногенних ландшафтів поблизу військових полігонів України. *Пошукова та екологічна геохімія*. 2009. № 1(9). С. 48–52.
7. Сгорова Т.М., Корнілова Н.А., Мінералов О.І. Вплив критичного надлишку мікроелементів на розвиток культури ячмінь (*Hordeum*). *Agroecological journal*. 2022. № 2. С. 86–91. <https://doi.org/10.33730/2077-4893.2.2022.263322>
8. Цицюра Я.Г. Рекультивация і фітореємедіація деградованих земель: метод. вказівки. Вінниця: ВНАУ, 2023. 360 с.
9. Кучерявий В.П., Генік Я.В., Дида А.П., Колодко М.М. Рекультивация та фітомеліорація: навч.-метод. посібн. Львів: Вид-во НЛТУ України, 2006. 116 с.
10. Prasad M.N.V., Freitas H. Feasible Biotechnological and Bioremediation Strategies for Serpentine Soils and Mine Spoils. *Electron. J. Biotechnol.* 1999. Vol. 2, P. 35–50.
11. Горова А.І., Павличенко А.В., Борисовська О.О., Ґрунтова В.Ю., Деменко О.В. Біоіндикація: метод. рекомендації. Д.: Національний гірничий університет, 2014. 76 с.
12. Державні санітарні правила та норми. 2. Комунальна гігієна. 2.7. Ґрунт, очистка населених місць, побутові та промислові відходи, санітарна охорона ґрунту. «Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та визначення їх класу небезпеки для здоров'я населення»: ДСанПіН 2.2.7.029-99. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0029588-99#Text> (дата звернення: 23.03.2024).