

НАКОПИЧЕННЯ ZN У НАДЗЕМНІЙ МАСІ БАГАТОРІЧНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР НА РІЗНИХ ТИПАХ ҐРУНТІВ

Разанов С.Ф.¹, Алексєєв О.О.², Бахмат О.М.³, Крілевич В.Р.¹

¹Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького

вул. Пекарська, 50, 79010, м. Львів

²Вінницький національний аграрний університет

вул. Сонячна, 3, 21008, м. Вінниця

³Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»

вул. Шевченка, 12, 32316, м. Кам'янець-Подільський

razanovsergej65@gmail.com, alekseev_oleksiy@ukr.net

У статті здійснено оцінку вмісту цинку (Zn) у надземній вегетативній масі багаторічних енергетичних культур за вирощування на ґрунтах різного типу впродовж 2023–2025 років. Дослідження спрямовано на порівняльний аналіз накопичення Zn у біомасі міскантусу (*Miscanthus*), мальви пенсільванської (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby) та сільфію пронизанолістого (*Silphium perfoliatum* L.) на сірому лісовому, чорноземі типовому та дерново-підзолистому піщаному ґрунтах. Отримані у ході дослідження експериментальні дані дали змогу охарактеризувати міжрічну мінливість і ґрунтову специфіку акумуляції елемента. Для оцінки потенційної небезпеки розраховано коефіцієнт небезпеки Zn (Кн) як відношення фактичного вмісту до допустимого рівня (ДР) та проведено порівняння показників між роками і ґрунтовими групами.

Встановлено, що у всі роки досліджень і для всіх типів ґрунтів вміст Zn у надземній масі досліджених культур був істотно нижчим за ДР, а значення Кн залишалися суттєво меншими за 1, що свідчить загалом про безпечність біомаси за показником Zn. Виявлено виразну міжрічну динаміку, зокрема, у 2024 році зафіксовано найбільше підвищення концентрацій Zn і відповідних значень Кн порівняно з 2023 роком, тоді як у 2025 році зміни мали різноспрямований характер залежно від культури та типу ґрунту. Порівняльний аналіз показав видоспецифічні особливості акумуляції, зокрема, для міскантусу найвищі середні рівні Zn формувалися на сірому лісовому ґрунті (за узагальненням 2023–2025 рр.), тоді як для мальви пенсільванської та сільфію пронизанолістого максимальні значення частіше спостерігали на дерново-підзолистому піщаному ґрунті; найнижчі рівні накопичення переважно були характерні для чорнозему типового. Отримані результати мають практичне значення для екологічного контролю якості надземної біомаси багаторічних культур і обґрунтування безпечності її використання, а також можуть бути застосовані для вдосконалення системи агроекологічного моніторингу складу рослинної продукції на ґрунтах різних типів та оптимізації розміщення плантацій багаторічних енергетичних культур з урахуванням ґрунтових умов і міжрічної мінливості. *Ключові слова:* міскантус, мальва пенсільванська, сільфій пронизанолістий, ґрунт, вегетативна маса, елемент, коефіцієнт небезпеки.

Zn accumulation in aboveground biomass of perennial energy crops on different soil types. Razanov S., Alieksieiev O., Bakhmat O., Krilevych V.

The study assessed zinc (Zn) concentrations in the aboveground vegetative biomass of perennial energy crops grown on different soil types during 2023–2025. The research focused on a comparative analysis of Zn accumulation in the biomass of giant miscanthus (*Miscanthus*), Virginia mallow (*Sida hermaphrodita* (L.) Rusby), and cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) cultivated on grey forest soil, typical chernozem, and sod-podzolic sandy soil. The experimental data obtained made it possible to characterize interannual variability and soil-specific features of Zn accumulation. To evaluate potential risk, the Zn hazard coefficient (Hc) was calculated as the ratio of the measured concentration to the permissible level, and the indicators were compared across years and soil groups.

It was found that in all study years and for all soil types, Zn concentrations in the aboveground biomass of the investigated crops were substantially lower than the permissible level, and Hc values remained well below 1, indicating compliance with regulatory standards of the biomass with respect to Zn content. A pronounced interannual pattern was identified: the highest Zn concentrations and corresponding Hc values were recorded in 2024 compared with 2023, whereas in 2025 the changes were multidirectional depending on crop species and soil type. Comparative analysis revealed species-specific accumulation patterns: for miscanthus, the highest mean Zn levels (based on 2023–2025 averages) were observed on grey forest soil, whereas for Pennsylvania mallow and cup plant the highest values were more often recorded on sod-podzolic sandy soil; the lowest accumulation levels were predominantly associated with typical chernozem. The obtained results have practical value for environmental control of aboveground biomass quality in perennial crops and for substantiating the safety of its use. They can also be applied to improve agroecological monitoring of the elemental composition of plant products across different soil types and to optimize the placement of perennial energy crop plantations with regard to soil conditions and interannual variability. *Key words:* miscanthus, Virginia mallow, cup plant, soil, vegetative biomass, element, hazard coefficient.



Постановка проблеми. Склад рослинної біомаси є одним із ключових показників екологічної якості агрофітоценозів і безпечності подальшого використання продукції. Цинк (Zn) належить до життєво необхідних для рослин елементів, однак за певних ґрунтових умов його надходження та накопичення можуть істотно змінюватися, що зумовлює коливання концентрацій у надземній масі [1, 2]. У практиці вирощування багаторічних енергетичних культур це питання набуває особливого значення, оскільки біомаса використовується як сировина для біоенергетичних і технічних потреб, а стабільність її елементного складу визначає екологічні ризики, технологічні параметри переробки та вимоги до контролю якості [3, 4].

Водночас інтенсивність акумуляції Zn у рослинній масі формується не лише видовими особливостями, а й комплексом ґрунтових чинників, зокрема, типом ґрунту, реакцією середовища, вмістом органічної речовини, гранулометричним складом та доступністю рухомих форм елемента. Додаткову складність створює міжрічна мінливість, пов'язана з відмінностями гідротермічних умов вегетаційного періоду, яка здатна змінювати доступність мікроелементів і, відповідно, їх надходження в надземні органи [5]. У результаті навіть за однакової технології вирощування показники вмісту Zn можуть суттєво різнитися між роками та ґрунтовими групами.

Незважаючи на актуальність проблеми, для багаторічних культур, що набувають поширення в сучасному землекористуванні (міскантус, мальва пенсільванська, сильфій пронизанолистий), залишається недостатньо узагальнених даних щодо накопичення Zn у надземній вегетативній масі на ґрунтах різних типів у багаторічному циклі спостережень. Окремим практичним аспектом є потреба у зіставленні отриманих концентрацій із нормативними даними та використанні кількісних індикаторів (наприклад, коефіцієнта небезпеки) для оцінки можливих ризиків. Отже, необхідним є системний аналіз вмісту Zn у біомасі зазначених культур у динаміці років та за контрастних ґрунтових умов, що дозволить обґрунтувати екологічну безпечність біомаси й сформулювати підходи до моніторингу її елементного складу.

Актуальність дослідження. Багаторічні культури біоенергетичного та технічного напрямку (міскантус, мальва пенсільванська, сильфій пронизанолистий) дедалі ширше впроваджуються у сучасне землекористування завдяки високій продуктивності та здатності формувати значні обсяги надземної біомаси [6]. Водночас екологічна якість такої сировини визначається не лише виходом біомаси, а й її елементним складом, який може суттєво змінюватися залежно від типу ґрунту та умов року. Особливе значення має контроль вмісту мікроелементів, зокрема цинку (Zn), що є необхідним для рослин, проте за певних ґрунтово-екологічних умов

може інтенсивніше акумулюватися в надземних органах і впливати на безпечність та технологічні властивості біомаси [7].

Актуальність дослідження посилюється тим, що ґрунти різного типу (сірі лісові, чорноземи типові, дерново-підзолисті піщані) істотно відрізняються за фізико-хімічними характеристиками та доступністю рухомих форм елементів, що формує різні особливості надходження Zn у рослинну масу. Додатково міжрічна мінливість гідротермічних умов здатна змінювати інтенсивність поглинання мікроелементів і зумовлювати різноспрямовані коливання концентрацій у біомасі, навіть за незмінної технології вирощування. За таких умов своєчасне вивчення накопичення Zn у надземній вегетативній масі багаторічних культур та порівняння отриманих значень із допустимими рівнями є необхідним для обґрунтованої екологічної оцінки сировини.

Практична значущість полягає в тому, що результати можуть бути використані для удосконалення агроекологічного моніторингу елементного складу біомаси, вибору оптимальних ґрунтових умов для розміщення плантацій багаторічних культур та підвищення екологічної безпечності виробництва біомаси, орієнтованого на сталий розвиток і зниження потенційних ризиків для довкілля.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. На відміну від значної кількості публікацій, у яких оцінювання якості біомаси багаторічних культур обмежується показниками врожайності та енергетичної продуктивності, у цьому дослідженні акцент зроблено на еколого-нормативній оцінці елементного складу надземної вегетативної маси з використанням кількісного індикатора ризику (коефіцієнта небезпеки (Кн) [8]. Такий підхід дозволяє не лише фіксувати рівні накопичення Zn у біомасі, але й порівнювати їх із допустимим рівнем, забезпечуючи інтерпретацію результатів з позицій екологічної безпечності. Дослідження виконано у форматі багаторічних спостережень (2023–2025 рр.) на різних типах ґрунтів (сірий лісовий, чорнозем типовий, дерново-підзолистий піщаний ґрунт) із залученням трьох поширених багаторічних культур (*Miscanthus*, *Sida hermaphrodita* (L.) Rusby, *Silphium perfoliatum* L.). Це забезпечило можливість оцінити міжрічну мінливість та ґрунтову специфіку акумуляції Zn, що є важливим науковим завданням у контексті розвитку агроекології, екотоксикології та моніторингу складу рослинної продукції.

Практична значущість отриманих результатів полягає у їх придатності для екологічного контролю якості біомаси та оптимізації розміщення плантацій багаторічних культур з урахуванням типу ґрунту й міжрічних коливань показників. Матеріали дослідження можуть бути використані для удосконалення системи агроекологічного моніторингу складу рослинної сировини, а також для обґрунтування еко-

логічно безпечного виробництва біомаси в межах принципів сталого землекористування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Питання вмісту мікроелементів і потенційно токсичних елементів у біомасі рослин посідає важливе місце в сучасній агроекології та екологічній безпеці продукції. Цинк (Zn) розглядають як необхідний для рослин мікроелемент, який бере участь у ферментативних процесах і підтриманні метаболізму, проте його вміст у надземних органах істотно варіює залежно від ґрунтових умов, агротехнологій та метеорологічних чинників року [9]. У науковій літературі підкреслюється, що саме поєднання ґрунт–рослина–середовище визначає реальний рівень надходження Zn у біомасу та формує ризики відхилення показників від нормативно прийнятних значень [10].

Окремий напрям досліджень пов'язаний із багаторічними культурами, які використовують як джерело біомаси, зокрема, для біоенергетики та технічної сировини [6]. Для таких культур характерні довготривале функціонування кореневої системи, сезонні зміни інтенсивності поглинання елементів та відмінності у внутрішньорослинному перерозподілі мікроелементів. У публікаціях, присвячених багаторічним трав'янистим культурам, наголошується, що здатність акумулювати Zn у надземній масі є видоспецифічною і може відрізнитися навіть за близьких ґрунтових умов, що зумовлює необхідність проведення порівняльних досліджень [11].

Встановлено, що тип ґрунту є одним із ключових чинників, який регулює доступність елементів, зокрема, Zn для рослин. Фізико-хімічні характеристики (реакція середовища, вміст органічної речовини, гранулометричний склад, сорбційні властивості) визначають частку рухомих форм елемента та, відповідно, інтенсивність його надходження в рослини [4]. У цьому контексті важливими є дослідження, що порівнюють накопичення елементів на різних ґрунтах, оскільки саме такі підходи дозволяють коректно оцінити роль ґрунтового середовища. Також у практиці екологічної оцінки продукції поширеним підходом є використання відносних показників, наприклад, коефіцієнтів небезпеки, які дозволяють порівнювати дані між роками, культурами та ґрунтовими групами і формувати висновки щодо наближення до допустимих рівнів [12]. Така інтерпретація є особливо важливою для рослинної біомаси, що планується до подальшого використання у якості сировини.

Отже, попри наявність наукових досліджень щодо накопичення мікроелементів у рослинній біомасі, залишається недостатньо дослідженим комплекс питань, пов'язаних із порівняльною багаторічною (за роками) оцінкою вмісту Zn у надземній вегетативній масі багаторічних енергетичних культур на різних типах ґрунтів із одночасним застосуванням нормативного підходу та коефіцієнта небезпеки.

Невирішені частини загальної проблеми.

Попри значну кількість робіт, присвячених вмісту мікроелементів у рослинах, залишається невирішеним питання щодо динаміки вмісту Zn у надземній вегетативній масі багаторічних енергетичних культур у різні роки вегетації за подібних технологій вирощування. Також недостатньо даних щодо оцінки накопичення Zn залежно від типу ґрунту та реакції досліджуваних культур на ці умови. Саме ці недостатньо висвітлені питання (міжрічна динаміка, відмінності між типами ґрунтів і оцінка вмісту Zn відносно допустимих нормативів) розглянуто в цій статті.

Новизна. У межах дослідження вперше виконано багаторічну (2023–2025 рр.) порівняльну оцінку вмісту цинку (Zn) у надземній вегетативній масі трьох багаторічних енергетичних культур (міскантусу, мальви пенсільванської, сільфію пронизанолістого) за вирощування на трьох типах ґрунтів (сірий лісовий, чорнозем типовий, дерново-підзолистий піщаний). Важливим аспектом також є застосування коефіцієнта небезпеки (Кн) як кількісного показника наближення фактичного вмісту Zn у біомасі рослин до допустимого рівня (ДР) для порівняння між роками, різними типами ґрунтів і видами культур, що дозволило зафіксувати рівні накопичення Zn та підвищити інформативність дослідження для агроекологічного моніторингу й обґрунтування безпечності надземної біомаси багаторічних енергетичних культур.

Методологічне або загальнонаукове значення.

Дослідження поглиблює розуміння закономірностей накопичення мікроелементів у системі «ґрунт–рослина» та ролі типу ґрунту й міжрічної мінливості умов вегетації у формуванні елементного складу надземної біомаси багаторічних культур. Методологічне значення полягає у можливості використання запропонованого підходу як універсальної схеми для порівняння різних культур і ґрунтових умов у багаторічних дослідженнях, а також для формування системи моніторингу елементного складу біомаси, придатної для практичного застосування. У загальнонауковому аспекті результати є важливими для агроекології, ґрунтознавства, екологічної безпеки та сталого землекористування, оскільки забезпечують наукове обґрунтування планування вирощування багаторічних енергетичних культур і контролю якості біомаси за вмістом мікроелементів.

Виклад основного матеріалу. Тип ґрунту, його фізико-хімічні властивості й режим зволоження здатні істотно змінювати частку рухомих форм Zn, а отже формувати відмінності у вмісті елемента в біомасі навіть за однакової технології вирощування. Тому аналіз вмісту Zn у динаміці років і за різних ґрунтових умов є необхідним для коректної оцінки екологічної якості біомаси та її відповідності нормативним вимогам. У таблиці 1 наведено результати визначення вмісту цинку (Zn) у надземній вегетативній масі міскантусу за різних типів ґрунтів (2023–2025 рр.).

Таблиця 1

Вміст Zn у надземній вегетативній масі міскантусу, мг/кг

Тип ґрунту	Роки досліджень						ДР
	2023		2024		2025		
	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	
Сірий лісовий	7,21	7,0±0,07	14,91	14,70 ±0,14	12,57	12,57±0,21	50
	6,94		14,72		13,16		
	6,87		14,86		12,33		
	6,99		14,31		12,21		
Чорнозем типовий	6,48	6,34±0,06	15,90	15,87±0,05	6,30	6,28±0,16	50
	6,30		15,83		6,72		
	6,22		15,98		6,14		
	6,37		15,75		5,95		
Дерново-підзолистий піщаний	6,74	6,67±0,07	16,70	16,61±0,07	8,50	8,45±0,23	50
	6,60		16,40		9,03		
	6,51		16,63		8,37		
	6,81		16,72		7,91		

Наведені в таблиці 1 дані свідчать, що вміст Zn у надземній вегетативній масі міскантусу істотно залежав як від року досліджень, так і від типу ґрунту. Так, у 2023 р. показники були відносно низкими та близькими між ґрунтовими групами, тоді як у 2024 р. зафіксовано різке підвищення в усіх варіантах. У 2025 р. вміст Zn знову знизився на чорноземі типовому та дерново-підзолистому піщаному ґрунті, водночас на сірому лісовому ґрунті він залишався підвищеним (12,57 ± 0,21 мг/кг).

Порівняння між ґрунтами в межах кожного року показало, що у 2023 р. найвищий середній вміст Zn спостерігали на сірому лісовому ґрунті, найнижчий – на чорноземі типовому, а дерново-підзолистий піщаний займав проміжне положення. У 2024 р. максимальні значення були характерні для дерново-підзолистого піщаного та чорнозему типового, тоді як на сірому лісовому ґрунті відмічено нижчий рівень. У 2025 р. контраст між групами посилювався, зокрема, сірий лісовий ґрунт перевищував чорнозем типовий у 2 рази, а дерново-підзолистий піщаний – у 1,35 рази відносно чорнозему.

Щодо відповідності допустимому рівню, у всі роки та для всіх типів ґрунтів вміст Zn був суттєво нижчим за ДР. Частка від ДР становила, зокрема, для сірого лісового 14,00% (2023), 29,40% (2024), 25,14% (2025); для чорнозему типового – 12,68%, 31,74%, 12,56%; для дерново-підзолистого піщаного – 13,34%, 33,22%, 16,90%. Максимальне середнє значення (дерново-підзолистий піщаний, 2024) було нижчим за ДР у 3,0 рази, що підтверджує відсутність перевищень нормативу упродовж усього періоду спостережень.

Для узагальнення міжрічної динаміки та виявлення відмінностей між типами ґрунтів на рисунку 1 наведено середні за 2023–2025 рр. значення вмісту цинку (Zn) у надземній вегетативній масі міскантусу, мг/кг сухої речовини. Як видно з рис. 1, максимальний середній вміст Zn у надземній вегетативній масі міскантусу (за 2023–2025 рр.) встановлено на сірому лісовому ґрунті, що свідчить про найвищу інтенсивність надходження елемента в надземній біомасі за цих умов. На дерново-підзолистому піщаному ґрунті показник був дещо нижчим, тобто на 0,92 мг/кг (8,1%) менше порівняно із сірим лісовим ґрунтом. Найменший середній вміст Zn зафіксовано на чорноземі типовому, зокрема він був на 1,93 мг/кг (16,9%) нижчий від значення на сірому лісовому та на 1,01 мг/кг (9,6%) нижчий порівняно з дерново-підзолистим піщаним ґрунтом.

Загалом типи ґрунтів за середньою здатністю забезпечувати накопичення Zn у надземній масі міскантусу розташовуються в такій послідовності: сірий лісовий > дерново-підзолистий піщаний > чорнозем типовий.

Як видно з рис. 2, середній коефіцієнт небезпеки Zn (Кн) у надземній вегетативній масі міскантусу змінювався залежно від типу ґрунту та залишався на відносно низькому рівні порівняно з допустимим.

Так, максимальне значення зафіксовано на сірому лісовому ґрунті, що відповідає близько 22% від ДР. На дерново-підзолистому піщаному ґрунті показник був дещо нижчим, тоді як мінімальний рівень відмічено на чорноземі типовому (19% від ДР). У середньому за 2023–2025 рр. типи ґрунтів за величиною Кн розташовувалися в такій послі-

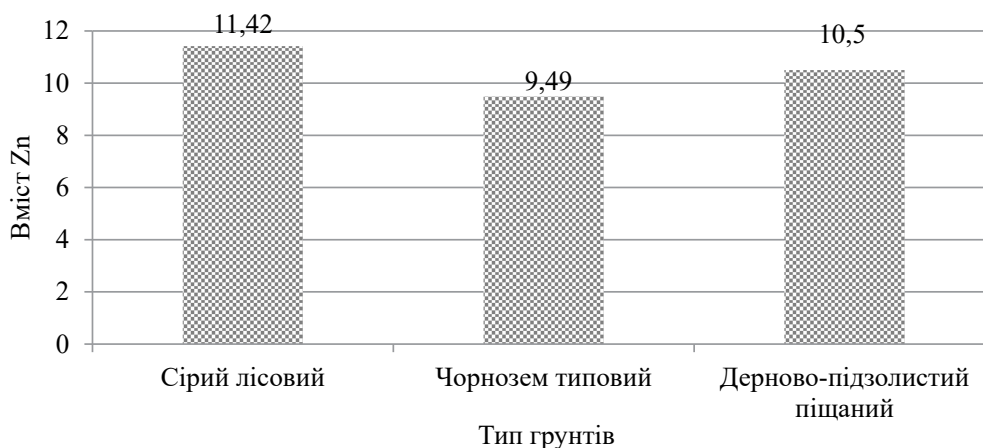


Рис. 1. Вміст Zn у надземній вегетативній масі міскантусу в середньому за 2023-2025 рр., мг/кг



Рис. 2. Коефіцієнт небезпеки Zn у надземній вегетативній масі міскантусу

довності: сірий лісовий > дерново-підзолистий піщаний > чорнозем типовий. Загалом упродовж 2023–2025 рр. для всіх типів ґрунтів Кн був суттєво меншим за 1, що свідчить про відсутність наближення вмісту Zn у надземній масі міскантусу до допустимого рівня.

У таблиці 2 наведено результати визначення вмісту цинку (Zn) у надземній вегетативній масі мальви пенсільванської за різних типів ґрунтів у 2023–2025 рр. Дані таблиці демонструють виражену залежність накопичення Zn у надземній вегетативній масі мальви пенсільванської як від року досліджень, так і від типу ґрунту. Загальна тенденція для всіх ґрунтових груп є зростання вмісту Zn у 2025 р. порівняно з 2023–2024 рр., тоді як між 2023 і 2024 рр. зміни були переважно помірними. Зокрема, у сірому лісовому ґрунті середній вміст Zn у 2023–2024 рр. залишався близьким ($8,34 \pm 0,28 \rightarrow 8,50 \pm 0,11$ мг/кг), але в 2025 р. різко підвищився до $13,45 \pm 0,20$ мг/кг, що вказує на посилення акумуляції елемента в надземній біомасі. На чорноземі типовому у 2024 р. відмічено зниження відносно

2023 р. ($8,48 \pm 0,08 \rightarrow 8,20 \pm 0,12$ мг/кг), натомість у 2025 р. показник зріс до $9,75 \pm 0,11$ мг/кг. Для дерново-підзолистого піщаного ґрунту характерними були найвищі значення у 2023 р. ($9,88 \pm 0,15$ мг/кг) і найбільша варіабельність у 2024 р. ($9,47 \pm 0,49$ мг/кг), після чого у 2025 р. зафіксовано істотне підвищення до $13,57 \pm 0,20$ мг/кг.

Також порівняння між типами ґрунтів у межах кожного року показало, що в 2023 р. максимальні значення спостерігали на дерново-підзолистому піщаному ґрунті, тоді як на сірому лісовому та чорноземі типовому показники були нижчими і близькими між собою. У 2024 р. дерново-підзолистий піщаний ґрунт також характеризувався найвищим середнім вмістом Zn, сірий лісовий займав проміжне положення, а мінімальні значення відмічено на чорноземі типовому. У 2025 р. відмінності між ґрунтами посилювалися, зокрема, найвищі значення встановлено на дерново-підзолистому піщаному ($13,57 \pm 0,20$ мг/кг) та сірому лісовому ґрунті ($13,45 \pm 0,20$ мг/кг), тоді як на чорноземі типовому рівень був істотно нижчим ($9,75 \pm 0,11$ мг/кг).

Таблиця 2

Вміст Zn у надземній вегетативній масі мальви пенсільванської, мг/кг

Тип ґрунту	Роки досліджень						ДР
	2023		2024		2025		
	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	
Сірий лісовий	8,73	8,34±0,28	8,60	8,50±0,11	13,93	13,45±0,20	50
	8,91		8,74		13,55		
	7,79		8,42		13,37		
	7,94		8,24		12,96		
Чорнозем типовий	8,44	8,48±0,08	8,08	8,20±0,12	9,72	9,74±0,11	50
	8,34		7,93		10,05		
	8,71		8,34		9,68		
	8,44		8,47		9,53		
Дерново-підзолистий піщаний	9,44	9,88±0,15	8,39	9,47±0,9	13,60	13,57±0,20	50
	10,04		9,73		14,09		
	10,09		10,70		13,48		
	9,93		9,04		13,12		

Зіставлення з допустимим рівнем засвідчило, що у всі роки та для всіх типів ґрунтів вміст Zn залишався значно нижчим за норматив. Частка від ДР становила: для сірого лісового 16,68% (2023), 17,00% (2024), 26,90% (2025); для чорнозему типового – 16,96%, 16,40%, 19,50%; для дерново-підзолистого піщаного – 19,76%, 18,94%, 27,14%. Максимальні значення 2025 р. (дерново-підзолистий піщаний і сірий лісовий ґрунти) відповідали лише близько 27% від ДР, тобто були нижчими за допустимий рівень приблизно у 3,7 рази. Отже, отримані результати підтверджують відсутність перевищень ДР протягом 2023–2025 рр. та підкреслюють, що саме 2025 р. характеризувався найбільш інтенсивним накопиченням Zn у надземній масі мальви пенсільванської, особливо на сірому лісовому й дерново-підзолистому піщаному ґрунтах.

Для узагальнення міжрічних змін і порівняння впливу ґрунтових умов на акумуляцію Zn в надземній біомасі, на рисунку 3 наведено середні за 2023–2025 рр. значення вмісту Zn у надземній вегетативній масі мальви пенсільванської (мг/кг сухої речовини) для трьох типів ґрунтів.

Так, найвищий середній вміст Zn встановлено на дерново-підзолистому піщаному ґрунті (10,96 мг/кг). На сірому лісовому ґрунті показник був дещо нижчим і становив 10,09 мг/кг, тоді як найменші значення зафіксовано на чорноземі типовому (8,80 мг/кг). Різниця між максимальним і мінімальним рівнями становила 2,16 мг/кг, що відповідає приблизно 24,5% відносно чорнозему типового. Порівняно з чорноземом типовим вміст Zn був вищим на 14,7% для сірого лісового та на 24,5% для дерново-підзолистого піщаного. Отже, за середньою інтенсивністю накопичення Zn у надземній масі мальви пенсільван-

ської типи ґрунтів розташовуються в такій послідовності: дерново-підзолистий піщаний > сірий лісовий > чорнозем типовий.

Для оцінки потенційної небезпеки накопичення цинку в надземній вегетативній масі мальви пенсільванської розраховано коефіцієнт небезпеки Zn (Кн) як відношення фактичного вмісту елемента до допустимого рівня. На рисунку 4 наведено узагальнені значення Кн для різних типів ґрунтів (чим більше Кн, тим ближчий вміст Zn до ДР; Кн < 1 означає відсутність перевищення нормативу).

Як видно з рисунка, найвищий середній коефіцієнт небезпеки встановлено на дерново-підзолистому піщаному ґрунті, що відповідає близько 22% від ДР. На сірому лісовому ґрунті показник був дещо нижчим (20% від ДР), тоді як мінімальне значення характерне для чорнозему типового (17% від ДР). Отже, типи ґрунтів за величиною Кн розташовуються в такій послідовності: дерново-підзолистий піщаний > сірий лісовий > чорнозем типовий.

Динаміка за роками (за даними табл. 2) показала, що у 2023–2024 рр. значення Кн залишалися відносно стабільними, зокрема, для сірого лісового – 0,17 → 0,17, для чорнозему типового – 0,17 → 0,16, для дерново-підзолистого піщаного – 0,20 → 0,19. У 2025 р. відмічено найвиразніше зростання показника на сірому лісовому та дерново-підзолистому піщаному ґрунтах (до 0,27), тоді як на чорноземі типовому підвищення було помірнішим (до 0,20).

У цілому протягом 2023–2025 рр. для всіх типів ґрунтів Кн залишався суттєво меншим за 1, що свідчить про відсутність наближення вмісту Zn у надземній масі мальви пенсільванської до допустимого рівня, попри посилення показника у 2025 році на окремих ґрунтах.

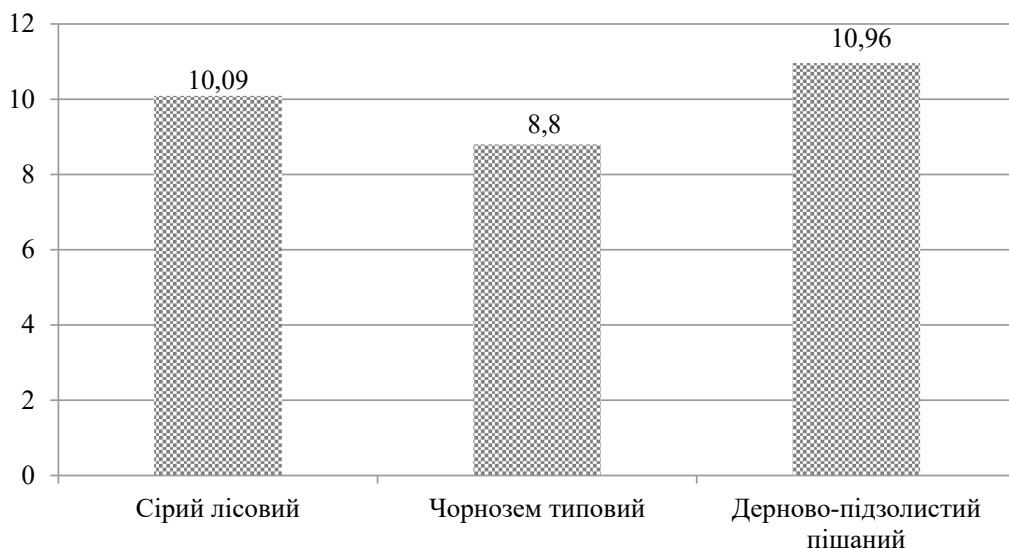


Рис. 3. Вміст Zn у надземній вегетативній масі м'явки пенсільванської в середньому за 2023–2025 рр., мг/кг

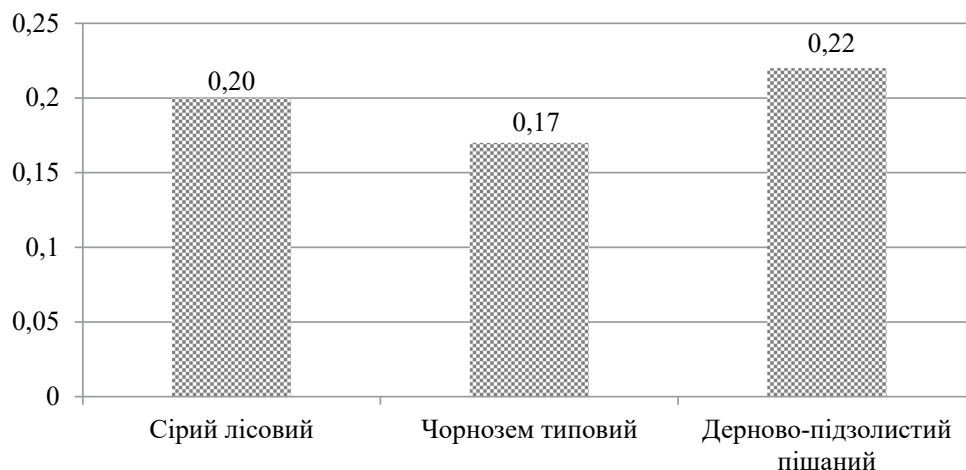


Рис. 4. Коефіцієнт небезпеки Zn у надземній вегетативній масі м'явки пенсільванської

У таблиці 3 наведено результати визначення вмісту Zn у надземній вегетативній масі сільфію пронизаного за різних типів ґрунтів у 2023–2025 рр. Дані таблиці свідчать, що вміст Zn у надземній вегетативній масі сільфію пронизаного змінювався залежно від року досліджень і типу ґрунту. Загалом у 2023–2024 рр. спостерігали відносно помірні значення, тоді як у 2025 р. для більшості ґрунтових груп відмічено тенденцію до підвищення, найвиразнішу на дерново-підзолистому піщаному ґрунті.

У сірому лісовому ґрунті середній вміст Zn у 2023 р. становив $6,54 \pm 0,05$ мг/кг, у 2024 р. зменшився до $6,22 \pm 0,09$ мг/кг, а у 2025 р. зріс до $7,05 \pm 0,14$ мг/кг. На чорноземі типовому значення були найнижчими в усі роки, зокрема, $5,54 \pm 0,09$ (2023), $5,25 \pm 0,20$ (2024) та $5,58 \pm 0,25$ мг/кг (2025), тобто річні коливання мали обмежений характер. Для дер-

ново-підзолистого піщаного ґрунту зафіксовано найвищі рівні Zn у надземній масі сільфію, зокрема, $7,31 \pm 0,09$ мг/кг у 2023 р., зниження до $6,63 \pm 0,25$ мг/кг у 2024 р., а у 2025 р. різке підвищення до $9,67 \pm 0,20$ мг/кг.

Порівняння між типами ґрунтів у межах кожного року показало, що в 2023 р. максимальний вміст Zn спостерігали на дерново-підзолистому піщаному ґрунті ($7,31 \pm 0,09$ мг/кг), проміжні значення – на сірому лісовому ($6,54 \pm 0,05$ мг/кг), а мінімальні – на чорноземі типовому ($5,54 \pm 0,09$ мг/кг). У 2024 р. зберігалася аналогічна закономірність ($6,63 \pm 0,25 > 6,22 \pm 0,09 > 5,25 \pm 0,20$ мг/кг). У 2025 р. контраст між ґрунтами посилювався, зокрема, дерново-підзолистий піщаний ґрунт ($9,67 \pm 0,20$ мг/кг) істотно перевищував сірий лісовий ($7,05 \pm 0,14$ мг/кг) і чорнозем типовий ($5,58 \pm 0,25$ мг/кг).

Таблиця 3

Вміст Zn у надземній вегетативній масі сільфію пронизанолистого, мг/кг

Тип ґрунтів	Роки досліджень						ДР
	2023		2024		2025		
	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	Фактичний вміст	У середньому по варіантах досліджу	
Сірий лісовий	6,41	6,54±0,05	6,04	6,22±0,09	7,05	7,05±0,14	50
	6,62		6,31		7,43		
	6,51		6,11		6,92		
	6,60		6,42		6,79		
Чорнозем типовий	5,56	5,54±0,09	5,03	5,25±0,20	5,65	5,58±0,25	50
	5,63		5,44		6,18		
	5,70		4,83		5,54		
	5,27		5,71		4,95		
Дерново-підзолистий піщаний	7,34	7,31±0,09	7,08	6,63±0,25	9,75	9,67±0,20	50
	7,07		6,38		10,18		
	7,51		6,04		9,53		
	7,31		7,03		9,21		

Зіставлення з допустимим рівнем (ДР) засвідчило, що в усі роки та для всіх типів ґрунтів вміст Zn був значно нижчим за норматив. Частка від ДР для сірого лісового становила 13,08% (2023), 12,44% (2024), 14,10% (2025); для чорнозему типового – 11,08%, 10,50%, 11,16%; для дерново-підзолистого піщаного – 14,62%, 13,26%, 19,34%. Максимальне значення (дерново-підзолистий піщаний ґрунт, 2025 р.) становило лише близько 19% від ДР і було нижчим за допустимий рівень приблизно у 5,2 раза. Отже, протягом 2023–2025 рр. перевищень ДР не встановлено, а найбільш інтенсивне накопичення Zn у надземній масі сільфію пронизанолистого відмічено на дерново-підзолистому піщаному ґрунті, особливо у 2025 році.

Для узагальнення міжрічних змін і наочного порівняння впливу ґрунтових умов на накопичення цинку в надземній біомасі сільфію пронизанолистого, на рисунку 5 наведено середні за 2023–2025 рр. значення вмісту Zn у надземній вегетативній масі (мг/кг сухої речовини) для трьох типів ґрунтів.

За даними, відображеними на рисунку 5, найвищий середній вміст Zn встановлено на дерново-підзолистому піщаному ґрунті. На сірому лісовому ґрунті показник був нижчим, а мінімальне значення зафіксовано на чорноземі типовому. Різниця між максимальним і мінімальним рівнями становила 2,41 мг/кг, що відповідає приблизно 44,2% відносно чорнозему типового. Порівняно з чорноземом типовим вміст Zn був вищим на 21,1% для сірого лісового та на 44,2% для дерново-підзолистого піщаного. Отже, за середньою інтенсивністю накопичення Zn у надземній масі сільфію пронизанолистого типи ґрунтів розташовуються в такій послідовності: дерново-підзолистий піщаний > сірий лісовий > чорнозем типовий.

Для оцінки ступеня наближення фактичного вмісту цинку в надземній вегетативній масі сільфію пронизанолистого до нормативного обмеження розраховано коефіцієнт небезпеки Zn. На рисунку 6 наведено узагальнені значення Кн для трьох типів ґрунтів.

Так, найвищий середній коефіцієнт небезпеки встановлено на дерново-підзолистому піщаному ґрунті, що відповідає близько 15% від ДР. На сірому лісовому ґрунті показник становив 13% від ДР, тоді як найнижче значення зафіксовано на чорноземі типовому 10% від ДР. Отже, типи ґрунтів за величиною Кн розташовуються в такій послідовності: дерново-підзолистий піщаний > сірий лісовий > чорнозем типовий.

Динаміка за роками показала, що у 2023–2024 рр. значення Кн були відносно стабільними або дещо знижувалися, зокрема, для сірого лісового – 0,13 → 0,12, для чорнозему типового – 0,11 → 0,10, для дерново-підзолистого піщаного – 0,15 → 0,13. У 2025 р. відмічено підвищення Кн у всіх групах, найбільш виразне на дерново-підзолистому піщаному ґрунті до 0,19, тоді як на сірому лісовому показник зріс до 0,14, а на чорноземі типовому залишався низьким (близько 0,11).

Загалом упродовж 2023–2025 рр. Кн у всіх типах ґрунтів залишався суттєво меншим за 1, що свідчить про відсутність наближення вмісту Zn у надземній масі сільфію пронизанолистого до допустимого рівня; водночас 2025 рік характеризувався найбільшим зростанням показника, особливо на дерново-підзолистому піщаному ґрунті.

Висновки. На основі проведених досліджень у 2023–2025 рр. встановлено, що вміст цинку (Zn) у надземній вегетативній масі досліджених бага-

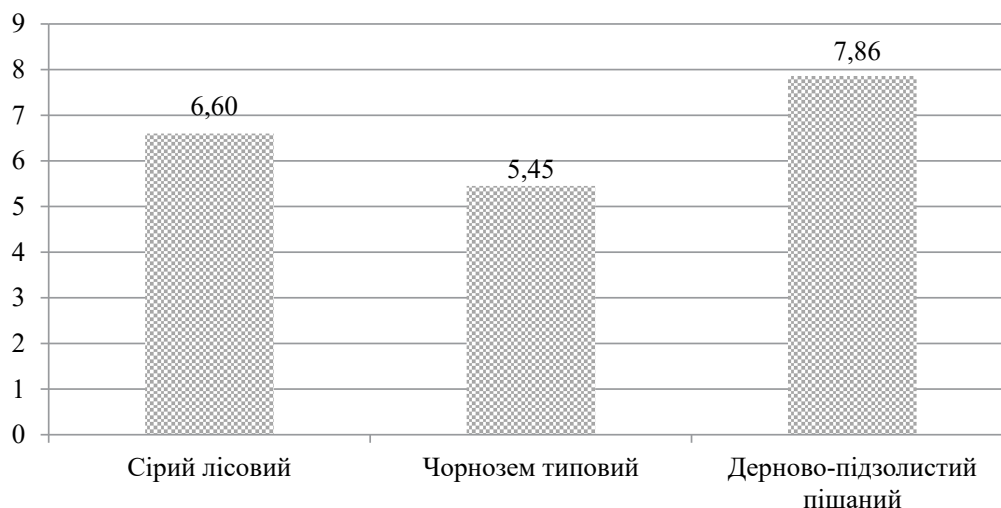


Рис. 5. Вміст Zn у надземній вегетативній масі сільфію пронизанолістого в середньому за 2023–2025 рр., мг/кг



Рис. 6. Коефіцієнт небезпеки Zn у надземній вегетативній масі сільфію пронизанолістого

торічних культур (міскантусу, мальви пенсільванської та сільфію пронизанолістого) суттєво залежить від типу ґрунту та року вегетації. Упродовж усього періоду спостережень не зафіксовано перевищення допустимого рівня, зокрема, фактичні концентрації Zn становили лише 10–33% від ДР, а коефіцієнт небезпеки (Кн) у всіх варіантах залишався істотно меншим за 1, що свідчить про нормативну безпечність отриманої надземної біомаси за показником Zn.

Виявлено чітку міжрічну закономірність: у 2023 р. значення були відносно нижчими, тоді як у 2024 р. зафіксовано різке підвищення вмісту Zn (і відповідних значень Кн), а у 2025 р. спостерігали різноспрямовані зміни залежно від культури та типу ґрунту (для міскантусу – зниження порівняно з 2024 р. із збереженням підвищених значень на сірому лісовому ґрунті). Порівняння між ґрунтовими групами підтвердило видоспецифічність накопичення. Так, для міскантусу найвищі середні значення Zn були

характерні для сірого лісового ґрунту (за узагальненням 2023–2025 рр.), тоді як для мальви пенсільванської та сільфію пронизанолістого максимальні рівні частіше спостерігали на дерново-підзолистому піщаному ґрунті, а мінімальні – на чорноземі типовому. Таким чином, результати підкреслюють доцільність урахування ґрунтових умов і міжрічних коливань під час оцінювання елементного складу біомаси багаторічних енергетичних культур та підтверджують низький ризик наближення вмісту Zn до нормативного обмеження за умов досліду.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати мають вагоме наукове й практичне значення, адже показують, як змінюється вміст Zn у надземній масі міскантусу, мальви пенсільванської та сільфію пронизанолістого залежно від типу ґрунту та за роками вирощування. Це дає змогу не лише узагальнити реальний рівень накопичення Zn у біомасі, а й чітко порівняти культури та ґрунтові групи між собою.

Практична цінність роботи полягає в тому, що отримані дані можна використовувати для контролю якості біомаси та її безпечності за показником Zn під час вирощування багаторічних культур на різних ґрунтах. Результати можна використовувати для вибору ділянок під закладання нових плантацій. Дослідження також може стати основою для удосконалення екологічного та агрохімічного моніторингу, адже аналіз вмісту Zn

у рослинній масі у поєднанні з аналізом ґрунтових показників (рН, органічна речовина, рухомі форми Zn) допоможе точніше пояснювати причини коливань і прогнозувати їх. Перспективним напрямом є розширення аналізу на інші елементи та показники якості біомаси (зольність, мінеральний склад), що підвищить обґрунтованість рекомендацій для сталого використання ґрунтів і виробництва біомаси.

Література

1. Ткачук О.П., Разанова А.М. Порівняльна оцінка накопичення Zn розторопшею плямистою (*Silybum marianum*) залежно від виду мінеральних добрив. *Агроекологічний журнал*. 2020. № 1. С. 98-103. DOI: <https://doi.org/10.33730/2077-4893.1.2020.201278>.
2. Снітинський В.В., Ткачук О.П., Разанова А.М., Коруняк О.П. Ефективність фітореMediaції забрудненого важкими металами ґрунту за вирощування розторопші плямистої. *Сільське господарство та лісівництво*. 2023. № 1. С. 164-171. DOI: [10.37128/2707-5826-2023-1-11](https://doi.org/10.37128/2707-5826-2023-1-11).
3. Чумбей В.В., Заїка В.К., Шеленко Д.І., Дмитрик П.М., Гусак В.В., Турак О.Ю. Агробіологічний та енергетичний потенціал багаторічних енергетичних культур на малородючих ґрунтах. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки*. 2025. Вип. 144. С. 229-236. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2025.144.29>.
4. Харитонов М.М., Мартинова Н.В., Бабенко М.Г., Клімкіна І.І. Оцінка виносу макро- та мікроелементів надземною масою міскантусу, вирощеного на техноземах. *Екологічні науки*. 2025. № 1(58). С. 117-122. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.20>.
5. Razanov S., Husak O., Polishchuk M., Bakhmat O., Koruniak O., Symochko L., Ovcharuk I. Accumulation peculiarities of heavy metals in cereal crops grains of different vegetation period in conditions of the Forest Steppe of the Right Bank of Ukraine. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science (IJEES)*. 2022. Vol. 12 (3). 43-50. DOI: <https://doi.org/10.31407/ijeec12.306>.
6. Токарчук Д. Огляд біоенергетичного потенціалу енергетичних культур для виробництва різних видів біопалив. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки*. 2024. № 6. С. 559-566. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2024-336-83>.
7. Гусак О.Б. Вплив мінерального удобрення ґрунтів на інтенсивність накопичення свинцю, цинку та міді у зерні озимих злаків в умовах Лісостепу Правобережного. *Таврійський науковий вісник. Сільськогосподарські науки*. 2024. Вип. 136(1). С. 70-76. DOI: <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2024.136.1.10>.
8. Харитонов М.М., Лемішко С.М., Бабенко М.Г. Післядія ґрунтових домішок на врожайність та якість біомаси міскантусу та прутноподібного проса, вирощених на техноземі в Степу України. *Екологічні науки*. 2025. № 2(59). С. 123-128. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.18>.
9. Razanov S., Husak O., Hnativ P., Dydiv A., Bakhmat O., Stepanchenko V., Pryshchepa A., Shcherbachuk V., Mazurak O. The Influence of the Gray Forest Soil Moisture Level on the Accumulation of Pb, Cd, Zn, Cu in Spring Barley Grain. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. 24(7). 285-292. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/164747>.
10. Разанов С., Алексєєв О., Дидів А., Бахмат О., Разанова А. Інтенсивність накопичення важких металів і мікроелементів у вегетативній масі бавовнику, вирощеного на сірих лісових ґрунтах Правобережного Лісостепу. *Вісник Львівського національного екологічного університету. Серія «Агрономія»*. 2025. № 29. С. 9-14. DOI: <https://doi.org/10.31734/agronomy2025.29.009>.
11. Razanov S., Aliksieiev O., Bakhmat O., Bakhmat M., Lytvyn O., Aliksieieva O., Vradii O., Mazur K., Razanova A., Mazurak I. Accumulation of Chemical Elements in the Vegetative Mass of Energy Cultures Grown on Gray Forest Soils in the Western Forest Steppe of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2024. 25(9). 282-291. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/191439>.
12. Dydiv A., Piddubna A., Gucol G., Vradii O., Zhylishchych Y., Titarenko O., Razanova A., Odnosum H., Postoienko D., Kerek S. Accumulation of Lead and Cadmium by Vegetables at Different Levels of Gray Forest Soil Moistening in the Conditions of the Right Bank Forest Steppe of Ukraine. *Journal of Ecological Engineering*. 2023. 24(10). 198-204. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/170291>.

Дата першого надходження статті до видання: 27.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 25.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.04.2026