

АКУМУЛЯЦІЯ ЦИНКУ ПРЕДСТАВНИКАМИ САПРОФАГІВ (DIPLOPODA, JULIDAE, ROSSIULUS KESSLERI) В УМОВАХ ХІМІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Похиленко А.П., Дідур О.О., Кульбачко Ю.Л., Федоров П.Р.
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара
пр. Гагаріна, 72, 49010, м. Дніпро
vivtash@ukr.net, didur@ua.fm, kulbachko57@ua.fm

Статтю присвячено аналізу особливостей накопичення цинку представниками двопарноногих багатоніжок (на прикладі ківсяка сірого) під дією хімічного навантаження різного рівня. Розглянуто проблему опустелювання, відтворення родючості ґрунту за рахунок тварин – екосистемних інженерів, висвітлено роль сапрофагів у забезпеченні регулятивних екосистемних послуг. З'ясовано рівень хімічного навантаження на представників ківсяка сірого з максимальною акумуляцією ківсяком цинку. *Ключові слова:* *Diplopoda*, ківсяк сірий (*Rossiulus kessleri*), лісова підстилка, екосистемні послуги, важкі метали, акумуляція цинку.

Акумуляція цинку представителями сапрофагів (*Diplopoda*, *Julidae*, *Rossiulus kessleri*) в умовах хімічної навантаження. Похиленко А.П., Дідур О.О., Кульбачко Ю.Л., Федоров П.Р. Стаття присвячена аналізу особливостей накопичення цинку представителями двопарноногих багатоножок (на прикладі ківсяка сірого) при впливі хімічної навантаження різного рівня. Розглянуто проблему опустелювання, відтворення родючості ґрунту за рахунок тварин – екосистемних інженерів, висвітлено роль сапрофагів у забезпеченні регулятивних екосистемних послуг. З'ясовано рівень хімічного навантаження на представників ківсяка сірого з максимальною акумуляцією ківсяком цинку. *Ключові слова:* *Diplopoda*, ківсяк сірий (*Rossiulus kessleri*), лісова підстилка, екосистемні послуги, важкі метали, акумуляція цинку.

Zinc accumulation by saprophagous (*Diplopoda*, *Julidae*, *Rossiulus kessleri*) in conditions of chemical loading. Pokhylenko A.P., Didur O.O., Kulbachko Y.L., Fedorov P.R. The study is devoted to the analysis of zinc accumulation by millipede representatives (case study *Rossiulus kessleri*) under the influence of a chemical load on different levels. The problem of desertification and soil fertility reproduction by animals "ecosystem engineers" is considered. It is highlighted the saprophagous role in providing of regulatory ecosystem services. The chemical load level with the maximum zinc accumulation on diplopoda is established. *Key words:* *Diplopoda*, *Rossiulus kessleri*, forest leaf-litter, ecosystem services, heavy metals, zinc accumulation.

Постановка проблеми. На території степового Придніпров'я України одним зі шляхів боротьби з посухою та оптимізації клімату є створення лісосмуг і штучних лісових насаджень, які забезпечують регулятивну екосистемну послугу. У лісових насадженнях функцію деструкторів відмерлого листя виконують безхребетні тварини – сапрофаги. Вони беруть участь у трансформації відмерлого листяного опаду, зміщують його з мінеральною частиною ґрунту і забезпечують таку екосистемну функцію, як захист ґрунтів від ерозії, підвищення родючості ґрунтів. Антропогенний вплив на штучні лісові екосистеми і сапрофагів як їх невід'ємну частину призводить до невиконання низки важливих екосистемних послуг.

У статті основна увага приділяється з'ясуванню величини акумуляції в сапрофагах такого промислового поллютанта, як цинк, надлишки якого накопичуються у ґрунті, рослинах та водних системах, що негативно впливає на їхній стан та продуктивність.

Актуальність дослідження. На сучасному етапі вплив людства на навколишнє середовище набув величезних масштабів, головними завданнями стали

боротьба з опустелюванням, захист ґрунтів від ерозії і підвищення їхньої родючості [1]. За останні 50 років близько 60% світових екосистемних послуг, 70% регулятивних і культурних послуг підірвано внаслідок антропогенного впливу на навколишнє середовище. Нині відбувається подальша їх деградація завдяки кліматичним змінам, зростанню народонаселення Землі, економічній експансії, зміні в землекористуванні [2].

Надані природою екосистемні послуги, такі як стабілізація клімату, очищення води і повітря, формування родючих ґрунтів та їх захист від ерозії, круговорот поживних речовин, продуктивність природних співтовариств і т. п., забезпечують добробут людства (якість життя) [3]. Екосистемні функції, які вважали невичерпними, насправді не безмежні та існують завдяки природному біологічному різноманіттю, порушення якого призводить до неминучого зниження їхньої ефективності. Посилення антропогенного тиску на природу призводить до скорочення біорізноманіття, руйнування природних комплексів і деградації життєво важливих екосистемних функцій.

Це приносить істотний економічний збиток і представляє реальну загрозу для життя і здоров'я людей. Світовою сучасною тенденцією є зміна клімату [4] в бік посушливості та збільшення температури [5], особливо це спостерігається в семіаридних кліматичних зонах. За таких умов здійснення екосистемних послуг погіршується, тому вивчення окремих аспектів екосистемних послуг, упровадження їхніх результатів у процеси прийняття екологічних рішень мають принципове значення.

Результатом антропогенного впливу є забруднення навколишнього середовища, зокрема важкими металами, без тенденції до зниження. Для дослідження рівня забруднення застосовують різні екологічні тести, зокрема як тест-об'єкти в екологічному моніторингу часто використовують безхребетних тварин [6]. Групу найбільш небезпечних становлять такі важкі метали, як ртуть, свинець, кадмій, хром, марганець, нікель, кобальт, ванадій, мідь, залізо, цинк, олово, миш'як [7], які є одними з головних антропогенних забруднювачів середовища. У складі промислових викидів нараховують близько 10–20 хімічних елементів. Однак у найбільших кількостях трапляються і завдають найбільшої шкоди 4–6 елементів. Металургійні заводи формують характерні зони забруднення свинцем, цинком, кадмієм, ртуттю, міддю; біля свинцево-плавильних підприємств, окрім свинцю та цинку, головними забруднювачами є кадмій, мідь, ртуть, арсен, селен [8].

Антропогенне забруднення ґрунтів цинком, джерелами якого є підприємства кольорової металургії та агротехнічна діяльність, призводить до його високої акумуляції у верхньому шарі ґрунту різних територій. Відновлення забруднених цинком ґрунтів зазвичай засноване на обмеженні його біодоступності шляхом внесення вапна або органічної речовини [13]. На території Дніпропетровської області сконцентровано великі металургійні комплекси, і, за даними 2015 р., викиди в атмосферу становлять 723,9 тис. т, скиди стічних вод – 751 млн. м³. У цілому, за даними ВОЗ, щорічно на поверхню нашої планети потрапляє 121,5 тис. т цинку [9].

Цинк має високу токсичність по відношенню до живих організмів. Його сполуки не руйнуються в ґрунті, воді, рослинах і організмі тварин, вони можуть тривалий час зберігатися в об'єктах навколишнього середовища, мігрувати і накопичуватися в тканинах тварин і за певних умов здатні передаватися в ланках трофічного ланцюга «ґрунт – рослина – тварина – продукти тваринництва – людина» [10; 11]. Попередні дослідження показали, що основні зміни відбуваються у верхньому шарі ґрунту, який є геохімічним центром ґрунту [12]. З атмосферними опадами щорічно на 1 км² поверхні Землі випадає у середньому 72 кг цинку – в три рази більше, ніж свинцю, і в 12 разів більше, ніж міді. Загальний уміст цинку в ґрунті коливається від 1 до 300 мг/кг, за вмісту цинку у верхньому шарі ґрунту до 8–13% від

загального його вмісту значно зменшується чисельність і різноманіття ґрунтової біоти [13]. Розподіл та зв'язування Zn у техногенно трансформованих ґрунтах відбувається залежно від складу поллютантів упродовж тривалого часу, а по-друге, зумовлено специфікою ландшафту території та буферними властивостями ґрунтів [14].

Збереження родючості ґрунту, його рекультивация та ремедіация в антропогенних екосистемах до певного ступеня можливі за умови збереження комплексу ґрунтових тварин, які забезпечують виконання екосистемних послуг (підвищення родючості ґрунту і захист його від ерозії) [15–19]. Разом із тим роль окремих груп тварин і структуру їхніх комплексів в умовах антропогенного навантаження на екосистему вивчено недостатньо. Метою представленого дослідження є оцінка накопичення цинку сапрофитами в умовах хімічного навантаження.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Представлені матеріали – частина науково-дослідної роботи «Екологічні основи зоопертинентного впливу тварин на процеси оптимізації природних і порушених екосистем в умовах сучасного природокористування» (номер держреєстрації 0117U001207, замовник – МОН України).

Виклад основного матеріалу. Об'єкт дослідження – представники *Diplopoda (Julidae)* – *Rossiulus kessleri* (Lohmander, 1927) – сірого ківсяка. Це еврибіонт, звичайний для лісів, південних дібров, лісополос помірних широт. Приймає активну участь у деструкції опалого рослинного матеріалу та, як результат, у забезпеченні ґрунту родючості. Вид екологічно пластичний, світлолюбивий. Матеріал для дослідження збирали в межах міста Дніпро (лісопарк Дружби народів, парк «Севастопольський», ділянка штучного лісового масиву поблизу аеропорту).

Лісопарк Дружби народів розташований у північній частині міста Дніпро, знаходиться на початку Новомосковського шосе, навпроти смт Слобожанське. Домінантна деревна порода – дуб звичайний (*Quercus robur* L.). Підстилка двошарова, щільна, зчеплена, складається з напіврозкладеного і розкладеного листя дуба та інших деревно-чагарникових порід. Проби лісової підстилки відбирали на території парку, де практично відсутнє рекреаційне навантаження, тобто відбувається процес натуралізації зелених насаджень. Із підстилки відбирали листя клена польового, які в подальшому використовували в експерименті як кормову базу ківсяка сірого.

Парк «Севастопольський» розташований у центральній частині міста Дніпро. Підстилка розсипчаста, одношарова, складається з відмерлого листя ясеня звичайного (*Fraxinus excelsior* L.), робінії псевдоакації (*Robinia pseudoacacia* L.) та дуба звичайного (*Quercus robur* L.). Із підстилки відбирали листя робінії псевдоакації, які в подальшому використовували в експерименті як кормову базу ківсяка сірого.

Представників *R. kessleri* збирали у штучному лісовому насадженні на околицях міста Дніпро, у 2 км від аеропорту. Домінуючими породами дерев є ясен звичайний (*Fraxinus excelsior* L.), клен польовий (*Acer campestre* L.). Підстилка міцна, одношарова. З підстилки відбирали листя клена польового, які в подальшому використовували в експерименті як кормову базу ківсяка сірого.

Особин *R. kessleri* утримували в дволітрових контейнерах протягом 10 діб за температури +22 °С з метою акліматизації до лабораторних умов. Загалом в експерименті використали 12 контейнерів (пластикові ємності) і 90 екземплярів ківсяків. Листяний опад висушували до повітряно-сухого стану. По 25 г повітряно-сухої листяної підстилки (зваженою з точністю до 0,01 г) і по 10 осо-

бин *R. kessleri* вносили до кожного контейнеру. Експериментальні контейнери розміщували в затіненому місці лабораторії. Зволожували підстилку кожні дві-три доби розчином цинку відомої концентрації. Використовували розчин сульфату цинку ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$) у лінійці концентрацій – 0,006 г/л, 0,03 г/л, 0,15 г/л. Для випробування кожної концентрації розчину солі цинку та у контролі (досліди без обробки підстилки сульфатом цинку) використовували по три контейнери.

Уміст цинку (валова форма) визначали в ківсяках та їх екскрементах атомно-адсорбційним методом на спектрофотометрі ААС-30 (Karl Zeiss, Jena, Germany). Зразки спочатку висушували до постійної ваги за температури 105 °С і спалювали (сухе озонення), потім аналізували на вміст цинку [20].

Таблиця 1

Результати дисперсійного аналізу

Дисперсія	Сума квадратів	Ступені свободи	Середній квадрат	F-відношення	P-рівень
ОСНОВНИЙ ЕФЕКТ					
• Хімічне навантаження	267191,	3	89063,7	18,76	0,0002
• Кормова база	11610,1	1	11610,1	2,45	0,1489
• Об'єкт дослідження	71888,3	1	71888,3	15,14	0,0030
ЗАЛИШКОВА	47473,7	10	4747,4		
У ЦІЛОМУ (скоригована)	398163,	15			

Таблиця 2

Описова статистика вмісту цинку (мг/кг) у ківсяках та їхніх екскрементах за кожним фактором та його градацією

Градація фактора	Кількість	Середнє арифметичне	Стандартна похибка	Границя 95%-го довірчого інтервалу	
				нижня	верхня
Хімічне навантаження (г $ZnSO_4$ /1 л розчину)					
• Контроль	4	174,37	34,45	97,60	251,13
• 0,006	4	259,89	34,45	183,13	336,65
• 0,03	4	398,08	34,45	321,32	474,84
• 0,15	4	512,14	34,45	435,38	588,90
Кормова база					
• підстилка з листя Асер	8	309,18	24,36	254,90	363,46
• підстилка з листя • Robinia	8	363,06	24,36	308,78	417,33
Об'єкт дослідження					
• ківсяк сірий	8	403,15	24,36	348,87	457,43
• екскременти ківсяка сірого	8	269,09	24,36	214,81	323,37

Таблиця 3

Результати множинного рангового тесту Тьюкі щодо оцінки впливу хімічного навантаження на ківсяків у результаті їх живлення листяною підстилкою з різним умістом цинку

Хімічне навантаження	Кількість	Середній уміст цинку, мг/кг	Однорідність груп
Контроль	4	174,36	X
0,006	4	259,89	X X
0,03	4	398,08	X X
0,15	4	512,14	X

Одержані результати опрацьовували статистичними методами (дисперсійний аналіз) [21]. Для порівняння середніх значень застосовували критерій достовірно значущої різниці групових середніх Тьюкі [22]. Відмінності були визнані статистично значущими за $P \leq 0,05$.

За результатами опрацювання одержаних даних можна стверджувати про наявність статистично значущого впливу хімічного навантаження та розбіжності середнього вмісту цинку за об'єктом дослідження (у ківсяках та в їхніх екскрементах). З'ясовано, що запропонована кормова база не впливає на особливості розподілу цинку в ківсяках в умовах хімічного навантаження середовища (табл. 1).

У контролі зафіксовано найменший середній вміст цинку, що логічно, оскільки у цих дослідах хімічне навантаження відсутнє, максимальний вміст виявлено під час впливу найбільшої концентрації (табл. 2).

За результатами парних порівнянь встановлено, що вміст цинку в ківсяках чітко відрізняється для контролю і майже кожної концентрації розчину сульфату цинку – 0,03 г/л і 0,15 г/л, виборки яких не утворюють між собою однорідної групи (табл. 3).

Найбільша абсолютна різниця вмісту цинку в ківсяках та їхніх екскрементах характерна для такого контрасту, як «контроль – розчин сульфату цинку 0,15 г/л», мінімальна – для контрасту «контроль – розчин сульфату цинку 0,006 г/л» (табл. 4).

Таблиця 4

Статистична оцінка вмісту цинку в ківсяках залежно від рівня хімічного навантаження

Порівнювана пара (контраст)	Статистична різниця	Абсолютна різниця вмісту цинку в порівнюваній парі
Контроль – 0,006 г/л	–	-85,53
Контроль – 0,03 г/л	*	-223,72
Контроль – 0,15 г/л	*	-337,78
0,006 г/л – 0,03 г/л	–	-138,19
0,006 г/л – 0,15 г/л	*	-252,25
0,03 г/л – 0,15 г/л	–	-114,06

Примітка: «–» – розбіжності середніх статистично недостовірні; * – існує статистична достовірна різниця середніх із рівнем значущості $P \leq 0,05$.

Таблиця 5

Оцінка впливу різної за видовим складом листяної підстилки на вміст цинку в ківсяках у ході їх живлення в умовах хімічного навантаження (за ранговим тестом Тьюкі)

Кормова база	Кількість	Середній вміст цинку, мг/кг	Однорідність груп
Підстилка з листя Acer	8	309,18	X
Підстилка з листя Robinia	8	363,06	X

Таблиця 6

Статистична оцінка вмісту цинку в ківсяках залежно від запропонованої кормової бази за умов хімічного навантаження

Порівнювана пара (контраст)	Статистична різниця	Абсолютна різниця вмісту цинку в порівнюваній парі
Підстилка з листя Acer • підстилка з листя Robinia	–	-53,88

Примітка: «–» – розбіжність середніх статистично недостовірні.

Таблиця 7

Оцінка вмісту цинку в ківсяках та їхніх екскрементах у ході живлення тварин в умовах хімічного навантаження (за ранговим тестом Тьюкі)

Об'єкт дослідження	Кількість	Середній вміст цинку, мг/кг	Однорідність груп
Екскременти ківсяка сірого	8	269,09	X
Ківсяк сірий	8	403,15	X

Таблиця 8

Статистична оцінка вмісту цинку в ківсяках та їхніх екскрементах

Порівнювана пара (контраст)	Статистична різниця	Абсолютна різниця вмісту цинку в порівнюваній парі
Ківсяк сірий – екскременти ківсяка сірого	*	134,06

Примітка: * – існує статистична достовірна різниця середніх із рівнем значущості $P \leq 0,05$.

За результатами парних порівнянь встановлено, що середній уміст цинку в ківсяках не відрізняється від того, яку підстилку ці сапрофаги споживали – кленову або робінієву. Виборки за двома кормовими базами утворюють статистично однорідну групу (табл. 5).

Результати парного порівняння контрасту кормової бази ківсяків не доводять наявності статистичної різниці вмісту цинку в ківсяках залежно від видової належності листяної підстилки (табл. 6).

Доведено, що середній уміст цинку в ківсяках більший, ніж уміст цинку в його екскрементах. Виборки утворюють статистично неоднорідну групу даних (табл. 7).

Результати парного порівняння вмісту цинку в ківсяках та їхніх екскрементах свідчать про наявність статистичної різниці (табл. 8).

Головні висновки. За умов моделювання хімічного навантаження на представників двопарноногих багатоніжок було встановлено, що в екскрементах ківсяка спостерігається в 1,5 рази менший уміст цинку, ніж у самому ківсяку, а видова належність запропонованого листяного опаду статистично не впливає на акумуляцію цинку. Навпаки, рівень хімічного навантаження прямим чином статистично достовірно впливає на вміст цинку в ківсяку та його екскрементах.

Література

1. Большаков А.М., Крутько В.Н., Пуцилло Е.В. Оценка и управление рисками влияния окружающей среды на здоровье населения. Москва : Эдиториал УРСС, 1999. 256 с.
2. Андреева Н.Н., Поляничко Е.В. Анализ потенциала и перспектив внедрения платы за экосистемные услуги в рекреационно-туристической сфере Украины. *Економічні інновації*. 2013. Вип. 54. С. 7–18.
3. Kadem D.E.D., Rached O., Krika A., Gheribi-Aoulmi Z. Statistical analysis of vegetation incidence on contamination of soils by heavy metals (Pb, Ni and Zn) in the vicinity of an iron steel industrial plant in Algeria. *Environmetrics*. 2004. Vol. 15(5). P. 447–462. URL: <https://doi.org/10.1002/env.673>.
4. Stott D.E., Moebius-Clune B.N. Soil Health: Challenges and Opportunities. In: Field, D. J., Morgan, C. L. S., McBratney, A. B. (Eds.) *Global Soil Security. Progress in Soil Science*. Springer, Cham, 2017. P. 109–121.
5. Інтегральна оцінка стану популяцій рідкісних видів рослин / Г. Клименко та ін. *Ukrainian Journal of Ecology*. 2017. № 7(2). С. 201–209. DOI: 10.15421/2017_37.
6. Assessing toxicity of metal contaminated soil from glassworks sites with a battery of biotests / M. Hagner et al. *Science of the total environment*. 2018. Vol. 613–614. P. 30–38. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.121>.
7. Бокова Т.И. Закономерности детоксикации антропогенных загрязнителей (тяжелых металлов) в системе «почва – растение – животное – продукт питания человека»: дис. ... докт. биол. Наук : 03.00.16. Красноярск, 2005. 345 с.
8. Динаміка забруднення вод сільськогосподарського призначення солями важких металів в умовах Полтавщини / В.В. Коваль та ін. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2012. № 1. С. 40–44.
9. URL: <https://dnepr.comments.ua/article/2018/10/16/140017.html>.
10. Godwin C.M., Smits J.E.G., Barclaya R.M.R. Metals and metalloids in nestling tree swallows and their dietary items near oilsands mine operations. *Northern Alberta*. 2016. Vol. 562. P. 714–723. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.069>.
11. Kalugina O.V., Mikhailova T.A., Shergina O.V. Pinus sylvestris as a bio-indicator of territory pollution from aluminum smelter emissions. *Environmental Science and Pollution Research*. 2017. № 24(11). P. 10279–10291. URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8674-5>.
12. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта : учебное пособие ; изд. 3-е, перераб. и доп. Москва : Астрей-2000, 1999. 798 с.
13. Біологічне різноманіття України. Дніпропетровська область. Ґрунти. Метали у ґрунтах : монографія / Н.М. Цветкова та ін. ; за заг. ред. проф. О.Є. Пахомова. Дніпро : ЛІРА, 2016. 180 с.
14. Determining the speciation of Zn in soils around the sediment ponds of chemical plants by XRD and XAFS spectroscopy and sequential extraction / Minkina T. et al. *Science of the total environment*. 2018. Vol. 634. P. 1165–1173. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.118>.
15. Didur O.A., Kulbachko Y.L., Gasso V.Y. Accumulation of microelements by different invertebrate trophic groups on wasted lands. *Ukrainian journal of ecology*. 2018. Vol. 7(4). P. 30–34. DOI: 10.15421/2017_83.
16. Тишков А.А. Экологическая реставрация нарушенных экосистем Севера. Москва : УРАО, 1996. 113 с.
17. Spurgeon D.J., Hopkin S.P. The effects of metal contamination on earthworm populations around a smelting works: quantifying species effects. *Applied soil ecology*. 1996. Vol. 4(2). P. 147–160. URL: [https://doi.org/10.1016/0929-1393\(96\)00109-6](https://doi.org/10.1016/0929-1393(96)00109-6).
18. Read H.J., Martin M.H., Rayner J.M.V. Water, Air, & Soil Pollution. 1998. № 106 (1–2). P. 17–42. URL: <https://doi.org/10.1023/A:1004917829355>.
19. Brygadyrenko V., Ivanyshyn V. Changes in the body mass of Megaphyllum kievense (Diplopoda, Julidae) and the granulometric composition of leaf litter subject to different concentrations of copper. *Journal of forest science*. 2015. № 61(9). P. 369–376. DOI: 10.17221/36/2015-JFS.
20. Хавезов И., Цалев Д. Атомно-абсорбционный анализ. Ленинград : Химия, 1983. 144 с.
21. Юденков В.А. Дисперсионный анализ. Минск : Бизнесофсет, 2013. 76 с.
22. McDonald J.H. Handbook of biological statistics ; 3rd edn. Baltimore : Sparky House Publishing, 2014. 299 p.