

ВПЛИВ ҐРУНТОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ РІДКІСНОЗЕМЕЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ НА РОЗПОДІЛ БІОМАСИ ТА МІНЕРАЛЬНИЙ ПРОФІЛЬ *MISCANTHUS SINENSIS*

Гусак В., к. б. н., доцент

Коцюбинський В., д. фіз.-мат. н., професор

Григорів Я., к. с.-г. н., доцент

Задарко В., магістрант

Карпатський національний університет імені Василя Стефаника,
м. Івано-Франківськ, Україна

Боброва О., к. б. н., докторант

Інститут проблем кріобіології і кріомедицини Національної академії наук України,
м. Харків, Україна

Збереження функціонального стану ґрунтів за техногенного навантаження потребує оцінювання не лише присутності забруднювачів, а й їхнього впливу на рослинний компонент системи «ґрунт–рослина». Рідкісноземельні елементи (РЗЕ) дедалі частіше розглядають як чинник техногенного навантаження на ґрунтові екосистеми; за підвищених концентрацій лантаноїди можуть порушувати ріст, мінеральне живлення та структурно-функціональний стан рослин [1]. Багаторічні злаки роду *Miscanthus* завдяки розвиненій кореневій системі та здатності формувати значну біомасу розглядають як перспективні культури для фітоменеджменту забруднених земель [2].

Метою дослідження було оцінити біологічні наслідки РЗЕ-навантаження ґрунтового субстрату за змінами росту, розподілу біомаси та органоспецифічного мінерального профілю *Miscanthus sinensis* “Zebrinus”. Рослини вирощували упродовж трьох місяців у субстраті ґрунт : пісок : перліт (2:1:1) з початковим рН $6,0 \pm 0,2$ за сумарного внесення 0, 300 та 3000 мг РЗЕ/кг сухого ґрунту. Суміш містила 25% La, 50% Ce, 5% Pr, 15% Nd і 5% Sm від загальної маси внесених РЗЕ. Для кожного варіанта використовували п’ять біологічних повторностей. Оцінювали довжину пагонів, свіжу, суху, зольну та беззольну масу пагонів і коренів, частку коренів у загальній сухій біомасі та співвідношення сухої маси пагін/корінь.

Елементний профіль коренів і пагонів визначали методом енергодисперсійного рентгенофлуоресцентного аналізу після озолення рослинного матеріалу. Через перекриття характеристичних піків лантаноїдів у спектрах за умов використаного РФА сигнал, програмно атрибутований як Nd, у цій роботі інтерпретували не як селективне визначення неодиму, а як умовний інтегральний аналітичний сигнал РЗЕ; надалі його позначено як «РЗЕ». Наведені відсоткові значення характеризують відносну частку цього сигналу та інших елементів у зольній фракції, а не абсолютні концентрації у тканинах. Для сумісного аналізу органів композиційні дані піддавали CLR-перетворенню та оцінювали лінійною змішаною моделлю з факторами «орган», «доза» та їх взаємодією; взаємодію додатково перевіряли перестановочним тестом.

Інтегральний сигнал РЗЕ аналізували окремо, оскільки він був відсутній у контрольних коренях і в пагонах усіх варіантів.

РЗЕ-навантаження ґрунтового субстрату вже за 300 мг/кг істотно змінювало формування та розподіл біомаси (табл. 1). Довжина пагонів зменшилася на 13,8%, їх свіжа маса – на 52,0%, тоді як суха маса коренів зросла на 52,2%. За 3000 мг/кг пагони були коротшими на 20,0%, а суха маса коренів перевищувала контроль на 112%. Частка коренів у загальній сухій біомасі зросла з 47,5% у контролі до 69,8 і 74,4% відповідно, а співвідношення пагін/корінь знизилося з 1,10 до 0,43 і 0,34. Одночасне зростання беззольної сухої маси коренів свідчить, що посилення підземного компонента було пов'язане не лише зі збільшенням мінеральної фракції, а й із перерозподілом органічної біомаси.

Таблиця 1

Ростові та біомасові показники *M. sinensis* “Zebrinus” за різного рівня РЗЕ-навантаження ґрунтового субстрату

Показник	Контроль	300 мг/кг	Зміна, %	3000 мг/кг	Зміна, %
Довжина пагонів, см	50,6 ± 3,1	43,6 ± 1,5	-13,8	40,5 ± 1,7	-20,0
Свіжа маса пагонів, г	4,48 ± 1,15	2,15 ± 0,55	-52,0	2,28 ± 0,32	-49,0
Суха маса пагонів, г	0,621 ± 0,118	0,370 ± 0,101	-40,4	0,411 ± 0,076	-33,8
Свіжа маса коренів, г	0,775 ± 0,167	1,649 ± 0,380	+113	2,159 ± 0,288	+179
Суха маса коренів, г	0,562 ± 0,096	0,855 ± 0,280	+52,2	1,192 ± 0,352	+112
Беззольна суха маса коренів, г	0,379	0,540	+42,3	0,744	+96,3
Частка коренів у загальній сухій біомасі, %	47,5	69,8	-	74,4	-
Співвідношення сухої маси пагін/корінь	1,10	0,43	-	0,34	-

Примітка. Для масових показників наведено $M \pm SD$, $n = 5$; беззольну суху масу та інтегральні співвідношення розраховано із середніх значень.

Зміна розподілу біомаси супроводжувалася органоспецифічною перебудовою елементного складу мінеральної фракції (табл. 2). Найбільш

показовою була коренева локалізація інтегрального сигналу РЗЕ: за його відсутності в контролі відносна частка в кореневій золі становила $1,082 \pm 0,719\%$ при 300 мг/кг і $2,384 \pm 1,889\%$ при 3000 мг/кг; у пагонах сигнал РЗЕ не виявляли. Загальний ефект дози для цього показника був статистично значущим (перестановочне $p = 0,005$). Такий профіль відповідає переважному кореневому затриманню РЗЕ; зокрема, для представника РЗЕ описано іммобілізацію в клітинних стінках і малорозчинних сполуках кореня [3].

Таблиця 2

Відносні масові частки ключових елементів мінеральної фракції коренів і пагонів за РЗЕ-навантаження ґрунтового субстрату, %

Елемент	Орган	Контроль	300 мг/кг	3000 мг/кг
Al	корені	$1,744 \pm 0,501$	$2,571 \pm 0,729$	$2,951 \pm 0,714$
Al	пагін	$1,155 \pm 0,071$	$1,313 \pm 0,066$	$1,343 \pm 0,123$
Ca	корені	$32,73 \pm 3,24$	$30,49 \pm 4,42$	$29,46 \pm 3,91$
Ca	пагін	$4,052 \pm 0,344$	$7,541 \pm 1,983$	$11,53 \pm 2,92$
Mn	корені	$0,117 \pm 0,025$	$0,135 \pm 0,057$	$0,030 \pm 0,067$
Mn	пагін	$0,0159 \pm 0,0019$	$0,0323 \pm 0,0063$	$0,0647 \pm 0,0259$
Fe	корені	$2,712 \pm 1,016$	$5,180 \pm 1,655$	$5,855 \pm 0,586$
Fe	пагін	$0,0517 \pm 0,0214$	$0,0803 \pm 0,0211$	$0,0470 \pm 0,0066$
РЗЕ*	корені	ND	$1,082 \pm 0,719$	$2,384 \pm 1,889$
РЗЕ*	пагін	ND	ND	ND

Примітка. Дані наведено як $M \pm SD$, $n = 5$ біологічних повторностей. ND – аналітичний сигнал нижче порогу виявлення. РЗЕ* – умовний інтегральний сигнал у спектральній області, програмно атрибутований як Nd; через перекриття піків лантанодів його не трактували як селективне визначення неодиму.

Для Al, Ca, Mn і Fe статистично підтверджено взаємодію «орган $\times$ доза», тобто перебудова мінерального профілю залежала одночасно від рівня РЗЕ-навантаження та органа рослини. Для Al і Fe основні зміни концентрувалися в коренях: відносна частка Al послідовно зростала, а Fe за обох доз був приблизно вдвічі вищим, ніж у контролі. Для Ca найвиразніша реакція формувалася в пагонах, де його частка збільшилася від $4,052 \pm 0,344\%$ до $11,53 \pm 2,92\%$ за максимальної дози. Для Mn за високого навантаження спостерігалася протилежна динаміка між органами: зменшення відносного представлення в коренях одночасно зі зростанням у пагонах. Отже, РЗЕ-забруднення змінювало не лише ріст, а й співвідношення компонентів мінеральної фракції, що характеризує порушення звичного елементного гомеостазу рослини за техногенно зміненого ґрунтового середовища.

З позицій використання рослин для підтримання функціональності техногенно порушених ґрунтів важливим є поєднання двох встановлених ознак: переважної кореневої локалізації інтегрального сигналу РЗЕ та істотного збільшення кореневої біомаси. Корені також характеризувалися підвищеним відносним представленням Al і Fe, тоді як пагін демонстрував інший напрям перебудови для Ca і Mn. Така пластичність узгоджується з уявленням про адаптивну роль корневих функціональних ознак *M. sinensis* на РЗЕ-порушених субстратах [4]. Водночас зниження довжини та маси пагонів уже за 300 мг/кг показує, що утримання РЗЕ переважно підземною частиною супроводжується виразними фізіологічними витратами.

Таким чином, модельне ґрунтове навантаження сумішшю La, Ce, Pr, Nd і Sm змінює рослинний компонент системи «ґрунт–рослина» через одночасну перебудову росту, розподілу біомаси та мінерального профілю *M. sinensis* “Zebrinus”. Переважна локалізація інтегрального сигналу РЗЕ у коренях, збільшення кореневої й беззольної кореневої біомаси та органоспецифічні зміни Al, Ca, Mn і Fe свідчать про активну перебудову ресурсного й елементного балансу за техногенно зміненого ґрунтового середовища. Отримані показники доцільно розглядати як біологічні індикатори наслідків РЗЕ-забруднення ґрунту та як обґрунтування подальшого оцінювання *Miscanthus* для фітоменеджменту порушених земель; водночас високе навантаження суттєво обмежує продуктивність надземної біомаси.

Література

1. Adeel M., Lee J. Y., Zain M. et al. Cryptic footprints of rare earth elements on natural resources and living organisms. *Environment International*. 2019. Vol. 127. P. 785–800. DOI: 10.1016/j.envint.2019.03.022.
2. Pidlisnyuk V., Stefanovska T., Lewis E. E., Erickson L. E., Davis L. C. *Miscanthus* as a Productive Biofuel Crop for Phytoremediation. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 2014. Vol. 33, No. 1. P. 1–19. DOI: 10.1080/07352689.2014.847616.
3. Shi K., Liu C., Liu D., Lyu K., Chen J., Wang X. The accumulation and effect of rare earth element neodymium on the root of rice seedlings. *Environmental Science and Pollution Research*. 2021. Vol. 28, No. 35. P. 48656–48665. DOI: 10.1007/s11356-021-14072-5.
4. Zhu S., Xu D., Liu W. et al. Variations in root functional traits facilitate the adaptation of pioneer plants to rare earth element mine tailings. *Journal of Applied Ecology*. 2025. Vol. 63, No. 1. e70219. DOI: 10.1111/1365-2664.70219.