

РЕАКЦІЯ ПРОРОСТКІВ ПШЕНИЦІ ОЗИМОЇ НА ДІЮ МІКРОЕЛЕМЕНТІВ (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+}) В УМОВАХ ВОДНОЇ КУЛЬТУРИ

О.С. Заблоцька, Н.М. Опанащук

Житомирський національний агроекологічний університет

Наведено результати досліджень впливу іонів Купруму, Цинку та Ніколу в молярних концентраціях від 0,5 до 50,0 ммоль/л на ріст і розвиток проростків пшениці озимої в умовах водної культури. Виявлено видову специфічність реакції пшениці озимої на підвищення молярних концентрацій важких металів. Встановлено концентрацію іонів, що стимулюють (Cu^{2+} , Zn^{2+}) та гальмують (Cu^{2+} , Ni^{2+}) ріст зародкових корінців та паростків. Обчислено кореневі та паросткові індекси проростків пшениці озимої у межах досліджуваних концентрацій та їхні середні значення. Здійснено порівняння стійкості проростків пшениці озимої щодо фітотоксичної дії іонів Cu^{2+} , Zn^{2+} і Ni^{2+} .

Ключові слова: Купрум, Цинк, Нікол, молярна концентрація, умови водної культури, пшениця озима, стимулювальний і гальмувальний впливи, фітотоксичність, стійкість до дії важких металів, кореневий індекс, паростковий індекс.

Пшениця озима (*Triticum aestivum* L.) — одна з основних продовольчих культур України. Її вирощування здійснюється в умовах тотального техногенного забруднення ґрунтів важкими металами (ВМ). Ці метали надходять у ґрунт разом із промисловими, сільськогосподарськими і побутовими відходами та вносяться цілеспрямовано під сільськогосподарські культури у вигляді мікродобрив і пестицидів.

Відомо, що за концентрацій ВМ, нижчих від ГДК, мембрани рослинних клітин, зокрема й пшениці, пропускають у клітину лише необхідну кількість іонів цих елементів. Однак за підвищених концентрацій ВМ у ґрунті цей захисний механізм руйнується: до рослини починає надходити їх надлишкова кількість. Внаслідок цього відбувається зростання фітотоксичного впливу, насамперед на насіння і проростки рослин.

За статистичними даними ґрунти України найбільше потерпають від забруднення сполуками Купруму, Цинку, Кадмію, Кобальту, Ніколу і Плюмбуму [1, 2]. Необхідність вирощування екологічно безпечної продукції обумовлює нагальну потребу в

активізації наукових пошуків щодо встановлення для кожної сільськогосподарської культури концентрацій кожного з ВМ, що стимулюють, гальмують їх ріст або мають летальний чи інший впливи; шляхів вилучення токсичних металів із ґрунту.

Проведені останнім часом польові та лабораторні дослідження ростових показників проростків пшениці озимої внаслідок дії на них ВМ, зокрема в умовах водної культури, дали можливість встановити: стимулювальні, гальмувальні та летальні концентрації Pb для росту, розвитку і фізіологічно-біохімічних показників пшениці озимої з урахуванням рівня накопичення ВМ у органах рослин [3]; особливості впливу підвищених концентрацій Ni у ґрунті на ріст проростків пшениці озимої [4], різних концентрацій Pb і Cd за різних температур на проростання насіння двох сортів *Triticum aestivum* L. [5]; характер спільної дії синтетичних цитокінінів та іонів Cu, Zn, Pb, Ni на ріст зародкових корінців і пагонів [6]; порівняти за різних концентрацій фітотоксичність іонів Cu, Zn і Pb [7], Cu, Cr і Co [8], Cr, Cd, Mn і Zn [9].

Наразі неповною мірою висвітлено проблему порівняння реакції проростків пшениці озимої на їх вирощування в розчинах солей Cu^{2+} , Zn^{2+} і Ni^{2+} у межах мо-

лярних концентрацій (C_m) 0,5–50 ммоль/л. Це і визначило мету нашого дослідження. У ході роботи передбачалося встановити і порівняти: стимуловальні, гальмувальні та летальні концентрації цих ВМ щодо росту зародкових корінців і паростків; стійкість цієї сільськогосподарської культури до фітотоксичної дії вказаних іонів.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Як джерело Купруму, Цинку і Ніколу були використані розчини їх солей, що містять іони цих металів із ступенем окиснення +2: $NiSO_4 \cdot 7H_2O$; $CuSO_4 \cdot 5H_2O$; $ZnSO_4 \cdot 10H_2O$ в молярних концентраціях від 0,5 до 50 ммоль/л. Вибір саме цих солей був зумовлений наявністю в них катіонів ВМ, які можуть засвоюватися рослинами і переважають у рухомих формах елементів природного ґрунтового середовища. Окрім того, ці солі містять однакові аніони, що забезпечує їх ідентичний вплив на результати експерименту.

Експеримент провели в лабораторних умовах. Схема досліду передбачала пророщування насіння пшениці озимої впродовж семи днів у затемненому термостаті при +20°C. Для подальшого росту одержані проростки внесли у водну культуру на заздалегідь приготовлені розчини ВМ. Контролем були рослини, вирощені у дис-

тильованій воді. Вибірка варіантів кожного досліду становила 100 проростків. Кількість повторень експерименту була п'ятикратною. На 10-ту добу визначили показники інтенсивності росту проростків пшениці (довжину зародкових корінців та зелених паростків), а також візуальні ознаки фітотоксичного ефекту. Обробку експериментальних даних здійснили методами математичної статистики. Стійкість рослин до надлишку ВМ визначили методом кореневого тесту згідно з відповідною методикою [10]. Кореневий індекс (K_i) обчислили як співвідношення приросту зародкових корінців проростків пшениці дослідних варіантів (за впливу різних концентрацій ВМ) і приросту корінців контрольного варіанта. Також для дослідження стійкості рослин до надлишку ВМ, за аналогією з K_i , розробили та ввели в науковий обіг термін «паростковий індекс» (P_i). Його обрахували як співвідношення приросту зародкових паростків пшениці дослідних варіантів (за впливу різних концентрацій ВМ) і приросту паростків контрольного варіанта.

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результати досліджень щодо впливу іонів Купруму, Цинку та Ніколу на ріст і розвиток проростків пшениці озимої наведено в таблицях 1–3.

Таблиця 1

Вплив іонів Cu^{2+} на проростки пшениці озимої

C_m (ммоль/л)	Показники росту зародкових корінців				Показники росту зародкових паростків			
	Довжина, мм		Приріст, Δd , мм	K_i	Довжина, мм		Приріст, Δd , мм	P_i
	до експ.	після експ.			до експ.	після експ.		
Контроль	34	111	77	1,000	23	127	104	1,000
0,5	49	53	4	0,051	39	148	109	1,048
1,0	39	46	7	0,090	27	112	85	0,817
1,5	51	57	6	0,077	25	84	59	0,567
2,0	31	37	6	0,077	16	74	58	0,557
2,5	32	36	4	0,051	15	68	53	0,509
3,0	27	30	3	0,038	37	84	47	0,451
3,5	31	34	3	0,038	16	60	44	0,423
4,0	35	37	2	0,025	16	54	38	0,365

Закінчення таблиці 1

См (ммоль/л)	Показники росту зародкових корінців				Показники росту зародкових паростків			
	Довжина, мм		Приріст, Δd , мм	K_i	Довжина, мм		Приріст, Δd , мм	Π_i
	до експ.	після експ.			до експ.	після експ.		
4,5	33	35	2	0,025	17	42	25	0,240
5,0	36	37	1	0,012	17	41	24	0,230
10,0	28	29	1	0,012	14	25	11	0,105
15,0	28	28	0	0	19	19	0	0
20,0	27	27	0	0	18	18	0	0
25,0	28	28	0	0	16	16	0	0
30,0	37	37	0	0	19	19	0	0
35	30	30	0	0	18	18	0	0
40	32	32	0	0	18	18	0	0
45	28	28	0	0	15	15	0	0
50	30	30	0	0	16	16	0	0
K_i серед.				0,026	Π_i серед.			0,280

Таблиця 2

Результати дослідження впливу іонів Zn^{2+} на проростки пшениці озимої

См (ммоль/л)	Показники росту зародкових корінців				Показники росту зародкових паростків			
	Довжина, мм		Приріст, Δd , мм	K_i	Довжина, мм		Приріст, Δd , мм	Π_i
	до експ.	після експ.			до експ.	після експ.		
Контроль	34	111	77	1,000	23	127	104	1,000
0,5	38	82	44	0,571	31	132	101	0,971
1,0	41	73	32	0,416	28	182	154	1,480
1,5	44	71	27	0,351	30	176	146	1,403
2,0	35	56	21	0,273	22	160	138	1,326
2,5	27	40	13	0,169	22	156	134	1,288
3,0	38	51	13	0,169	25	144	119	1,250
3,5	34	44	10	0,130	28	158	130	1,153
4,0	33	41	8	0,104	25	144	119	1,144
4,5	38	41	3	0,039	28	148	120	1,144
5,0	35	37	2	0,025	25	123	98	0,942
10,0	26	28	2	0,025	20	110	90	0,865
15,0	25	27	2	0,025	26	105	79	0,759
20,0	18	20	2	0,025	23	80	57	0,695
25,0	29	31	2	0,025	25	82	57	0,695

Закінчення таблиці 2

См (ммоль/л)	Показники росту зародкових корінців				Показники росту зародкових паростків			
	Довжина, мм		Приріст, Δd , мм	K_i	Довжина, мм		Приріст, Δd , мм	Π_i
	до експ.	після експ.			до експ.	після експ.		
30,0	23	25	2	0,025	18	84	66	0,634
35	20	22	2	0,025	19	64	45	0,432
40	18	20	2	0,025	15	54	39	0,375
45	15	16	1	0,012	18	49	31	0,298
50	16	17	1	0,012	18	49	31	0,298
K_i серед.				0,128	Π_i серед.			0,903

Таблиця 3

Результати дослідження впливу іонів Ni^{2+} на проростки пшениці озимої

См (ммоль/л)	Показники росту зародкових корінців				Показники росту зародкових паростків			
	Довжина, мм		Приріст, Δd , мм	K_i	Довжина, мм		Приріст, Δd , мм	Π_i
	до експ.	після експ.			до експ.	після експ.		
Контроль	34	111	77	1,000	23	127	104	1,000
0,5	34	39	5	0,064	27	111	84	0,807
1,0	60	63	3	0,038	29	90	61	0,586
1,5	49	51	2	0,025	31	109	78	0,461
2,0	53	55	2	0,025	29	74	45	0,432
2,5	50	52	2	0,025	28	62	34	0,326
3,0	19	21	2	0,025	25	50	25	0,240
3,5	48	49	1	0,012	37	62	25	0,240
4,0	48	49	1	0,012	29	53	24	0,230
4,5	50	51	1	0,012	30	53	23	0,221
5,0	47	48	1	0,012	34	57	23	0,221
10,0	41	42	1	0,012	39	57	18	0,173
15,0	27	28	1	0,012	15	28	13	0,125
20,0	26	27	1	0,012	15	26	11	0,105
25,0	25	25	0	0,000	19	30	11	0,105
30,0	27	27	0	0,000	16	27	11	0,105
35	25	25	0	0,000	16	26	10	0,096
40	23	23	0	0,000	19	27	8	0,076
45	27	27	0	0,000	17	25	8	0,076
50	25	25	0	0,000	15	20	5	0,048
K_i серед.				0,015	Π_i серед.			0,246

Дані експерименту надали можливість виявити деякі закономірності реакції проростків пшениці озимої на дію іонів Cu^{2+} за різних молярних концентрацій: а) при C_m цього іона 0,5 ммоль/л стимулюється ріст зелених паростків; б) приріст зелених паростків при C_m у межах 1,0–10,0 ммоль/л перебуває в обернено пропорційній залежності від зростання концентрації, про що свідчать величини відповідних Π_i ; в) при C_m у межах 15,0–50,0 ммоль/л відбувається повне гальмування росту зародкових корінців і паростків, що набувають блідого блакитно-зеленого кольору з коричневою плямою біля основи; г) проростки залишаються живими при величині C_m у межах 0,5–50,0 ммоль/л, (ці концентрації не є летальними для пшениці озимої); д) найбільша стійкість проростків до дії іонів Cu^{2+} спостерігається при C_m у межах 1–2 ммоль/л, про що свідчать величини відповідних K_i ; е) досліджувані молярні концентрації іонів Cu^{2+} не стимулюють ріст зародкових корінців проростків пшениці озимої.

Визначимо деякі закономірності реакції проростків пшениці озимої на дію іонів Zn^{2+} : а) ріст зелених паростків стимулюється при C_m цього іона у межах 1,0–4,5 ммоль/л, про що свідчать відповідні Π_i ; б) ріст зародкових корінців досліджувані рівні C_m не стимулюють; в) припинення росту зародкових корінців і паростків та загибель проростків при C_m у межах 15,0–50,0 ммоль/л не відбувається; г) найбільша стійкість проростків пшениці до дії іонів Zn^{2+} виявляється при C_m у межах 0,5–1,5 ммоль/л, про що свідчать величини K_i за цих концентрацій; д) при C_m іонів Zn^{2+} на рівні 10,0 ммоль/л і більше коренева система проростків майже не галузиться, спостерігається викривлення і потемніння зародкових корінців, що вказує на істотний фітотоксичний вплив іонів цього металу на пшеницю озиму за цих умов.

Узагальнимо ознаки реакції проростків пшениці озимої на дію іонів Ni^{2+} : а) досліджувані молярні концентрації іонів Ni^{2+} не стимулюють ріст зародкових корінців і зелених паростків; б) при C_m у межах 25,0–50,0 ммоль/л відбувається повне

гальмування росту зародкових корінців, бічні корінці не утворюються, виникає їх ламкість і потемніння; в) C_m іонів Ni^{2+} у межах 0,5–50,0 ммоль/л не є летальними для пшениці озимої; г) найбільша стійкість проростків пшениці до дії іонів Ni^{2+} спостерігається при C_m на рівні 0,5 ммоль/л, на що вказують величини K_i та Π_i .

Отже, за порівняння стимулювальної та гальмувальної дії іонів Купруму, Цинку і Ніколу на ріст зародкових корінців та паростків у межах досліджуваних молярних концентрацій; стійкості проростків пшениці озимої до їхньої фітотоксичної дії було встановлено, що: а) стимулювальний ефект росту стосується лише зелених паростків пшениці. Він більший за дію іонів Zn^{2+} , але менший унаслідок дії Cu^{2+} . Іони Ni^{2+} такої дії не виявляють; б) гальмувальна дія на ріст паростків пшениці озимої іонів цих ВМ зростає у такій послідовності: Zn^{2+} (поступове гальмування росту зародкових корінців і паростків) \rightarrow Ni^{2+} (різке гальмування лише росту зародкових корінців при 25 ммоль/л) \rightarrow Cu^{2+} (різке припинення росту зародкових корінців і паростків при 15 ммоль/л).

Порівняння середніх значень K_i та Π_i проростків пшениці озимої при C_m іонів ВМ у межах 0,5–50,0 ммоль/л (табл. 1–3) дає змогу вивести таку закономірність: фітотоксична дія досліджуваних іонів ВМ на проростки пшениці озимої послідовно зростає у такому порядку: Zn^{2+} ($K_{i \text{ серед.}} = 0,128$; $\Pi_i = 0,903$) \rightarrow Cu^{2+} ($K_{i \text{ серед.}} = 0,026$; $\Pi_i = 0,280$) \rightarrow Ni^{2+} ($K_{i \text{ серед.}} = 0,015$; $\Pi_i = 0,246$). У такому самому порядку зменшується стійкість проростків пшениці до дії іонів цих ВМ.

ВИСНОВКИ

Пшениці озимій (*Triticum aestivum* L.) властива видова специфічність щодо дії іонів Cu^{2+} , Zn^{2+} і Ni^{2+} . При концентраціях у межах 0,5–50 ммоль/л ріст її зелених паростків стимулюється іонами Zn^{2+} і, меншою мірою, — іонами Cu^{2+} . Іони Ni^{2+} за цих концентрацій стимулювальної дії на ріст рослин не мають. Зародкові корінці проростків пшениці виявляють вибір-

кову стійкість до дії досліджуваних іонів ВМ — поступово зменшують свій приріст у середовищі Цинку, натомість повністю припиняють свій ріст за дії іонів Купруму з C_m на рівні 15 ммоль/л і Ніколу з C_m — 25 ммоль/л. Середні значення K_i та P_i проростків пшениці озимої свідчать про найбільший фітотоксичний вплив на цю сільськогосподарську культуру іонів Ni^{2+} і найменший — іонів Zn^{2+} . Концентрації іонів Cu^{2+} , Zn^{2+} і Ni^{2+} у межах 0,5–50 ммоль/л

не є летальними для паростків пшениці озимої.

Перспективи подальших досліджень вбачаємо у визначенні більш вузьких меж молярних концентрацій іонів, що стимулюють ріст рослин: а) Zn^{2+} — до 1 ммоль/л; б) Cu^{2+} — у межах 0,5–1 та 4,5–5 ммоль/л.

Планується також встановити значення летальних для проростків пшениці озимої молярних концентрацій кожного з досліджуваних іонів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Національна доповідь про стан родючості ґрунтів [Електронний ресурс]. — Режим доступу: http://www.iogu.gov.ua/wp-content/uploads/2013/07/stan_gruntiv.pdf
2. Оцінювання процесів деградації земель та опустелювання: світовий та вітчизняний досвід / [Ю.Т. Колмаз, О.О. Ракоїд, Л. Д. Проценко, О.В. Легка] // *Агроекологічний журнал*. — 2015. — № 1. — С. 8–21.
3. *Скопечька О.В.* Еколого-фізіологічна оцінка свинцевого навантаження в системі «ґрунт — рослина» та прогнозування ступеня забруднення агроценозів: автореф. дис. ... канд. біол. наук: спец. 03.00.16 — «Екологія» / О.В. Скопечька. — К., 2001. — 18 с.
4. Rhizosphere characteristics of indigenously growing nickel hyperaccumulator and excluder plants on serpentine soil [Електронний ресурс] / [W.W. Wenzel, M. Bunkowski, M. Puschenreiter, O. Horak]. — Режим доступу: <http://link.springer.com/search?query=Wenzel+W.+W.%2C+Bunkowski+M.%2C+Puschenreiter+M.%2C+Horak+O.+%282003%29+Rhizosphere+characteristics+of+indigenously+growing+nickel+hyperaccumulator+and+excluder+plants+on+serpentine+soil.+Environ+Pollut+123%3A131%E2%80%93138>
5. *Öncel I.* Interactive effects of temperature and heavy metal stress on the growth and some biochemical compounds in wheat Seedlings [Електронний

ресурс] / I. Öncel, Y. Keleş, A.S. Üstün. — Режим доступу: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749199001773>

6. The effect of heavy metals and thidiazuron on winter wheat (*Triticum Aestivum* L.) seedlings / [K.A. Sazanova, Dmitry I. Bashmakov, Ausra Brazaityte, et al.] // *Zemdirbyste-Agriculture*. — 2012. — Vol. 99, No. 3. — P. 273–278.
7. *Mahmood Tariq.* Toxic effects of heavy metals on early growth and tolerance of cereal crops [Електронний ресурс] / Tariq Mahmood, K.R. Islam, S. Muhammad. — Режим доступу: <http://www.researchgate.net/publication/233419659>
8. *Gang A.* Toxic effect of heavy metals on germination and seedling growth of wheat / A. Gang, A. Vyas, H. Vyas // *Journal of Environmental Research and Development*. — 2013. — Vol. 8. — No. 2. — P. 206–213.
9. Phytotoxic effects of Heavy metals (Cr, Cd, Mn and Zn) on Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seed Germination and Seedlings growth in Black Cotton Soil of Nanded / [Isak Rajjak Shaikh, Parveen Rajjak Shaikh, Rafique Ahmed Shaikh, Alamgir Abdulla Shaikh] // *Research Journal of Chemical Sciences (India)*. — 2013. — Vol. 3(6). — P. 14–23.
10. Якість ґрунту. Визначання дії забрудників на флору ґрунту. — Ч. 1: Метод визначення гальмівної дії на ріст коренів: ДСТУ ISO 11269-1:2004. — К.: Держспоживстандарт України, 2005. — 9 с. — (Національний стандарт України).

REFERENCES

1. *Natsionalna dopovid pro stan rodiuchosti gruntiv* [National Report on the state of soil fertility]. — [Electronic resource]. Available at: http://www.iogu.gov.ua/wp-content/uploads/2013/07/stan_gruntiv.pdf (in Ukrainian).
2. Kolmaz Yu.T., Rakoid O.O., Protchenko L.D., Lehka O.V. (2015). *Otsiniuvannia protsesiv dehradatsii zemel ta opusteliuvannia: svitovyi ta vitchyzniansyi dosvid* [Evaluation process of land degradation and desertification, global and domestic experience]. *Ahroekologichnyi zhurnal* [Agroecology journal]. No. 1, pp. 8–21 (in Ukrainian).
3. Skopetska O.V. (2001). *Ekoloho-fiziologichna otsinka svyntsevoho navantazhennia v systemi «hrunt — roslina» ta prognuzuvannia stupenia zabrudnennia*

ahrotsenoziv [Ecological and physiological evaluation lead load in the system «soil — plant» and predicting the degree of contamination agrocenosis]. Kyiv, 18 p. (in Ukrainian).

4. Wenzel W.W., Bunkowski M., Puschenreiter M., Horak O. *Rhizosphere characteristics of indigenously growing nickel hyperaccumulator and excluder plants on serpentine soil* [Electronic resource]. Available at: <http://link.springer.com/search?query=Wenzel+W.+W.%2C+Bunkowski+M.%2C+Puschenreiter+M.%2C+Horak+O.+%282003%29+Rhizosphere+characteristics+of+indigenously+growing+nickel+hyperaccumulator+and+excluder+plants+on+serpentine+soil.+Environ+Pollut+123%3A131%E2%80%93138> (in English).

5. Öncel I., Keleş Y., Üstün A.S. Interactive effects of temperature and heavy metal stress on the growth and some biochemical compounds in wheat Seedlings [Electronic resource]. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749199001773> (*in English*).
 6. Sazanova Kristina A., Bashmakov Dmitry I., Brazaityte Ausra, Bobinas Ceslovas, Duchovskis Pavelas, Lukatkin Alexander S. (2012). The effect of heavy metals and thidiazuron on winter wheat (*Triticum Aestivum* L.) seedlings Zemdirbyste=Agriculture, Vol. 99, No. 3, pp. 273–278 (*in English*).
 7. Mahmood Tariq, Islam K.R., Muhammad S. *Toxic effects of heavy metals on early growth and tolerance of cereal crops* [Electronic resource]. Available at: <http://www.researchgate.net/publication/233419659> (*in English*).
 8. Gang A., Vyas A., Vyas H. (2013). Toxic effect of heavy metals on germination and seedling growth of wheat Journal of Environmental Research And Development, Vol. 8. No 2, pp. 206–213 (*in English*).
 9. Isak Rajjak Shaikh, Parveen Rajjak Shaikh, Rafique Ahmed Shaikh, Alamgir Abdulla Shaikh (2013). Phytotoxic effects of Heavy metals (Cr, Cd, Mn and Zn) on Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seed Germination and Seedlings growth in Black Cotton Soil of Nanded Research Journal of Chemical Sciences (India). – Vol. 3(6), pp. 14–23 (*in English*).
 10. DSTU ISO 11269-1:2004 *Yakist gruntu. Vyznachannia dii zabrudnykiv na floru gruntu. Ch. 1. Metod vyznachennia halmivnoi dii na rist koreniv* [State Standart ISO 11269-1:2004 The quality of the soil. Defining actions pollutants on soil flora. Part 1. The method of determining the braking action on root growth]. Kyev, Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2005, 9 p. (*in Ukrainian*).
-
-