

УДК 581.5:574.21

О. С. Заблоцька

д. пед. н.

Н. М. Опанащук

Житомирський національний агроекологічний університет

ПОРІВНЯННЯ ДІЇ ВИСОКИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ДЕЯКИХ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ НА ПШЕНИЦЮ ОЗИМУ В УМОВАХ ВОДНОЇ КУЛЬТУРИ

Досліджено фітотоксичну дію йонів Cu^{2+} , Zn^{2+} і Ni^{2+} у межах молярних концентрацій (C_m) $0,5\text{--}100 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ на проростки пшениці озимої в умовах водної культури. Виявлено, що зародкові корінці проростків виявляють вибірккову стійкість до дії досліджуваних йонів важких металів – поступово зменшують приріст і припиняють свій ріст за дії йонів Cu^{2+} з C_m на рівні $15 \cdot 10^{-3}$ моль/м³, Ni^{2+} з $C_m = 25 \cdot 10^{-3}$ моль/м³, Zn^{2+} з $C_m =$ вище $90 \cdot 10^{-3}$ моль/м³. Встановлено, що приріст зародкових паростків поступово спадає за дії йонів Ni^{2+} і Zn^{2+} в межах досліджуваних C_m , натомість повністю припиняється за C_m Cu^{2+} на рівні $15 \cdot 10^{-3}$ моль/м³. Обчислено середні кореневі й паросткові індекси, на основі чого виведено зростаючий ряд фітотоксичності досліджуваних йонів для пшениці озимої: Zn^{2+} ($K_{i \text{ серед.}} = 0,0866$; $P_i = 0,6382$) < Cu^{2+} ($K_{i \text{ серед.}} = 0,0171$; $P_i = 0,1832$) < Ni^{2+} ($K_{i \text{ серед.}} = 0,0099$; $P_i = 0,1703$). Обґрунтовано, що молярні концентрації йонів Cu^{2+} , Zn^{2+} і Ni^{2+} у межах $0,5\text{--}100 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ не є летальними для пшениці озимої.

Ключові слова: фітотоксичність, важкі метали, пшениця озима, молярна концентрація, водна культура, кореневі і паросткові індекси.

Постановка проблеми

Вирощування сільськогосподарської продукції в наш час відбувається в умовах значного техногенного забруднення ґрунтів. Найбільше потерпають ґрунти від важких металів, які надходять разом із промисловими і побутовими відходами, викидами транспорту, мінеральними добривами та засобами захисту рослин. Ці екологічні забруднювачі мають високу токсичність, великий період напіввидалення, легко накопичуються [7]. Значні концентрації важких металів у ґрунтах унаслідок міграційних процесів надходять і кумулюються у продукції рослинництва, тим самим суттєво погіршуючи її якість [3, 5].

Статистичні дані засвідчують, що «пріоритетними» поміж важких металів, які забруднюють ґрунти, є Купрум, Цинк, Кадмій, Кобальт, Нікол, Плюмбум та інші. Концентрації цих йонів у ґрунтах на деяких територіях України перевищують відповідні ГДК у 20–50 разів і більше [8]. Все це створює несприятливі умови для ведення рослинництва та становить загрозу для здоров'я населення [5].

Враховуючи сучасний екологічний стан забруднення ґрунтів важкими металами, є необхідність у порівнянні стійкості сільськогосподарських рослин до фітотоксичної дії їхніх високих концентрацій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Знання про фітотоксичність йонів важких металів мають велике практичне значення. Ця проблема є предметом дослідження багатьох вітчизняних і зарубіжних науковців. Провідне місце посідають роботи з вивчення фітотоксичності сполук Плюмбуму (свинцю) [2, 14, 15, 17], Хрому [13, 18–21], Кадмію [10, 13, 15, 20], Мангану (марганцю) [20], Цинку [2, 13, 15, 16, 20], Меркурію (ртуті) [11], Купруму (міді) [2, 10, 15, 22], Кобальту [18], Ніколу (нікелю) [15, 20] та інших.

Порівняння фітотоксичного впливу певних концентрацій важких металів на пшеницю озиму (*Triticum aestivum* L.) проведене щодо Cu, Zn, Pb, Ni, Cr, Cd [13] (1991 р.), Cu, Zn [16] (2005 р.), Cu, Pb, Zn [2, 6, 16] (2007–2009 р.р.), Cu, Co, Cr [19] (2011 р.), Zn, Cd, Mn, Cr [20] (2013 р.).

Залежність між різними концентраціями важких металів та їхньою токсичною дією на пшеницю озиму (*Triticum aestivum* L.) у польових і лабораторних умовах, зокрема – водної культури, розкрита у працях таких учених: D. Singh, K. Nath, Y. K. Sharma [21] (Cu: 5, 25, 50, 100 мг/л) (2007 р.); T. Mahmood, K. R. Islam, S. Muhammad [22] (Cu, Pb, Zn: 10 ммоль/л) (2007 р.); Т. М. Мисливої, Л. О. Герасимчук, Т. В. Кобильник, І. С. Минайлюк [2, 6] (Cu, Pb, Zn: 1, 5, 10, 15 ГДК) (2009 р.); M. Lamhamdi, O. Galiou, A. Bakrim та ін. [14, 17] (Pb: 0,05; 0,1; 0,5; 1 г/л) (2011 р.); (1,5; 3 і 15 ммоль/л) (2013 р.); A. C. Goncalves, H. Nacke, D. Schwantes, I. A. Nava, L. Strey [19] (Cu, Co, Cr: 0.1, 1, 5, 10, 50, 100, 200, 300, 400, 500 ppm) (2011 р.); V. S. Bheemareddy [12] (Cd: 50 і 100 мг/кг) (2013 р.); I. R. Shaikh, P. R. Shaikh, R. A. Shaikh, A. A. Shaikh [20] (Cd, Cr, Mn, Zn: 2, 4, 6, 8 і 10 мг/л) (2013 р.); S. Idrees, S. Shabir, N. Batool, S. Kanwal [10] (Cd: 150, 200 і 250 мкмоль/л) (2015 р.) та інших.

Однак проблема впливу високих концентрацій йонів важких металів на пшеницю озиму, а також порівняння їхньої фітотоксичної дії на цю культуру за цих концентрацій залишається поза увагою дослідників.

Мета, завдання та методика досліджень

Відповідно до закону толерантності Шелфорда, існування виду визначається лімітуючими чинниками, які знаходяться не лише в мінімумі, але й у максимумі. Отже, за наявності у ґрунтах завищених концентрацій йонів кількох важких металів в умовах техногенного забруднення найнебезпечнішим для рослин є метал, уміст якого найбільший.

Зважаючи на це, метою нашого дослідження стало виявлення та порівняння фітотоксичного впливу йонів Купруму, Цинку і Ніколу на пшеницю озиму за високих концентрацій цих металів.

Відомо, що фітотоксичність як здатність токсичних речовин чинити отруйну (токсичну) дію на рослини виявляється за різними ознаками, зокрема хлорозами їх тканин, пригніченням росту і розвитку коренів та стебел тощо. Тому завдання

досліджень передбачали: встановити й порівняти гальмувальні і летальні концентрації йонів цих важких металів щодо росту зародкових корінців та паростків; стійкості пшениці озимої до фітотоксичної дії вказаних йонів.

Дослідження провели на базі кафедри хімії ЖНАЕУ у травні-червні 2015–2016 рр. в умовах водної культури. Цей метод використовується у фізіології рослин, агрохімії й агроекології для вивчення ролі окремих елементів у мінеральному живленні рослин та для дослідження їх специфічної дії, зокрема – фітотоксичної [1].

Для проведення дослідження обрали пшеницю озиму (*Triticum aestivum* L.), оскільки вона є однією з основних продовольчих культур України.

Схема досліду передбачала пророщування насіння цієї культури упродовж семи днів у затемненому термостаті при $+20^{\circ}\text{C}$. Для подальшого росту одержані проростки внесли у водну культуру на заздалегідь приготовлені розчини важких металів. Як джерело Купруму, Цинку і Ніколу були використані розчини їх солей, що містять йони цих металів із ступенем окиснення $+2$: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$; $\text{ZnSO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ в молярних концентраціях від $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $100 \cdot 10^{-3}$ моль/м³. Вибір саме цих солей був зумовлений наявністю в них катіонів важких металів, 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. Контролем були рослини, вирощені у дистильованій воді.

Межі зазначених вище молярних концентрацій йонів важких металів обрали, зважаючи на їх середній уміст у відносно незабруднених та забруднених ґрунтових розчинах. Вибірка варіантів кожного досліду становила 100 проростків. Кількість повторень експерименту була п'ятикратною. На 10-у 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 за допомогою пакета прикладних програм Microsoft Excel та Statistica 6.0.

Відомо, що важкі метали належать до групи акропозитивних елементів, тобто елементів, які здебільшого накопичуються в коренях і стеблах рослин. Тому стійкість пшениці озимої до високих концентрацій важких металів визначили методом кореневого тесту згідно з відповідною методикою [9]. Кореневий індекс (K_i) обчислили як співвідношення приросту зародкових корінців проростків пшениці дослідних варіантів (за впливу різних концентрацій важких металів) і приросту корінців контрольного варіанта. Також для дослідження стійкості рослин до надлишку важких металів, за аналогією з K_i , розробили та ввели в науковий обіг термін «паростковий індекс» (Π_i). Його обрахували як співвідношення приросту зародкових паростків пшениці дослідних варіантів (за впливу різних концентрацій важких металів) і приросту паростків контрольного варіанта [4].

Результати досліджень

Відомо, що Купрум – це важливий мікроелемент, складова частина 19-и ферментів, які прискорюють процеси дихання рослин, вуглеводного обміну, засвоєння з ґрунту Ca, P, Fe, стимулюють біосинтез хлорофілу, фіксацію молекул N₂, сприяють стійкості рослин проти грибкових захворювань, посухи і низьких температур тощо. При нестачі йонів цього металу порушується перехід рослин у репродуктивну фазу розвитку, рослини в'януть, стають блідо-зеленими, сильно кущаться, кінчики листків біліють. З підвищенням концентрації Купруму в ґрунті вище норми виявляється його фітотоксична дія. Розглянемо результати впливу досліджуваних концентрацій Cu²⁺ на пшеницю озиму в умовах водної культури (табл. 1).

Таблиця 1. Результати дослідження впливу йонів Cu²⁺ у молярних концентраціях 0,5–100 · 10⁻³ моль/м³ на проростки пшениці озимої

C _м · 10 ⁻³ (моль/м ³)	Показники росту							
	зародкових корінців				зародкових паростків			
	l, мм		Δl, мм	K _i	l, мм		Δl, мм	Π _i
	до експ.	після експ.			до експ.	після експ.		
Дослідження 2015 року								
контроль	34,0	111,0	77,0	1,000	23,0	127,0	104,0	1,000
0,5	49,0	53,0	4,0	0,051	39,0	148,0	109,0	1,048
1,0	39,0	46,0	7,0	0,090	27,0	112,0	85,0	0,817
1,5	51,0	57,0	6,0	0,077	25,0	84,0	59,0	0,567
2,0	31,0	37,0	6,0	0,077	16,0	74,0	58,0	0,557
2,5	32,0	36,0	4,0	0,051	15,0	68,0	53,0	0,509
3,0	27,0	30,0	3,0	0,038	37,0	84,0	47,0	0,451
3,5	31,0	34,0	3,0	0,038	16,0	60,0	44,0	0,423
4,0	35,0	37,0	2,0	0,025	16,0	54,0	38,0	0,365
4,5	33,0	35,0	2,0	0,025	17,0	42,0	25,0	0,240
5,0	36,0	37,0	1,0	0,012	17,0	41,0	24,0	0,230
10,0	28,0	29,0	1,0	0,012	14,0	25,0	11,0	0,105
15,0	28,0	28,0	0	0	19,0	19,0	0	0
...								
50	30,0	30,0	0	0	16,0	16,0	0	0
Дослідження 2016 року								
контроль	31,4	151,8	120,4	1,000	26,6	176,4	149,8	1,000
55	36,6	36,6	0	0	26,0	26,0	0	0
...								
95	44,0	42,6	-1,4	0	27,2	27,2	0	0
100	42,2	40,6	-1,6	0	31,2	29,2	-2,0	0
K _i серед.				0,0171	Π _i серед.			0,1832

Умовні позначення: C_м – молярна концентрація йонів важкого металу в розчині; l – довжина; Δl – приріст довжини; K_i – кореневий індекс; П_i – паростковий індекс.

Дані експерименту надали можливість виявити деякі закономірності реакції проростків пшениці озимої на дію йонів Cu^{2+} за молярних концентрацій від $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $100 \cdot 10^{-3}$ моль/м³: а) при $0,5 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ виявляється стимулювальна дія йонів Купруму на зародкові паростки, порівняно з контролем; б) при C_m у межах $1,0\text{--}10,0 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ приріст зелених паростків перебуває в обернено пропорційній залежності від зростання концентрації, про що свідчать величини відповідних Π_i ; в) досліджувані молярні концентрації йонів Cu^{2+} не стимулюють ріст зародкових корінців проростків пшениці озимої; г) у межах C_m $1\text{--}2 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ спостерігається найбільша стійкість проростків до дії йонів Cu^{2+} , про що свідчать величини відповідних K_i і Π_i ; д) при C_m $15,0\text{--}100,0 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ відбувається повне гальмування росту зародкових корінців і паростків, вони набувають блілого блакитно-зеленого кольору з коричневою плямою біля основи; е) при C_m цього йона $95,0\text{--}100 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ спостерігається ламкість коренів, за рахунок чого їх приріст має від'ємне значення; є) досліджувані молярні концентрації йонів Cu^{2+} до $100,0 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ не є летальними для пшениці озимої, проростки залишаються живими, спостерігається ефект їх консервування.

Цинк також є важливим мікроелементом, який входить до складу 39 ферментів рослин, що прискорюють різні біохімічні процеси (утворення хлорофілу, вітамінів, ростових речовин (ауксинів), білків, підвищують жаро- та морозостійкість, впливають на утилізацію Фосфору в тканинах тощо). При нестачі його у ґрунті сповільнюється синтез триптофану, утворення ростових речовин, що призводить до карликового росту, деформації плодів, листків та стебел рослин. При надлишковій концентрації Цинку гальмуються біохімічні процеси в рослинах, які виявляються, насамперед, у зменшенні довжини зародкових корінців і паростків. Результати дослідження впливу йонів Zn^{2+} на проростки пшениці озимої за цими показниками наведені в табл. 2.

Таблиця 2. Результати дослідження впливу йонів Zn^{2+} у молярних концентраціях $0,5\text{--}100 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ на проростки пшениці озимої

$C_m \cdot 10^{-3}$ (моль/м ³)	Показники росту							
	зародкових корінців				зародкових паростків			
	l, мм		Δl , мм	K_i	l, мм		Δl , мм	Π_i
	до експ.	після експ.			до експ.	після експ.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Дослідження 2015 року</i>								
контроль	34,0	111,0	77,0	1,000	23,0	127,0	104,0	1,000
0,5	38,0	82,0	44,0	0,571	31,0	132,0	101,0	0,971
1,0	41,0	73,0	32,0	0,416	28,0	182,0	154,0	1,480
1,5	44,0	71,0	27,0	0,351	30,0	176,0	146,0	1,403
2,0	35,0	56,0	21,0	0,273	22,0	160,0	138,0	1,326
2,5	27,0	40,0	13,0	0,169	22,0	156,0	134,0	1,288

Закінчення таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3,0	38,0	51,0	13,0	0,169	25,0	144,0	119,0	1,250
3,5	34,0	44,0	10,0	0,130	28,0	158,0	130,0	1,153
4,0	33,0	41,0	8,0	0,104	25,0	144,0	119,0	1,144
4,5	38,0	41,0	3,0	0,039	28,0	148,0	120,0	1,144
5,0	35,0	37,0	2,0	0,025	25,0	123,0	98,0	0,942
...								
50	16,0	17,0	1,0	0,012	18,0	49,0	31,0	0,298
Дослідження 2016 року								
контроль	31,4	151,8	120,4	1,000	26,6	176,4	149,8	1,000
55	29,2	30,6	1,4	0,012	20,4	50,2	29,8	0,199
...								
90	23,8	24,2	0,4	0,003	26,8	40,6	16,6	0,111
95	29,4	28,0	-1,4	0	26,0	42,2	16,2	0,108
100	29,4	26,8	-2,6	0	26,0	38,8	12,8	0,085
Кі серед.				0,0866	Пі серед.			0,6382

Визначимо деякі закономірності реакції проростків пшениці озимої на дію йонів Zn^{2+} : а) при C_m цього йона у межах $1,0-4,5 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ ріст зелених паростків стимулюється, про що свідчать відповідні Π_i ; б) досліджувані рівні C_m ріст зародкових корінців не стимулюють; в) при C_m у межах $0,5-100,0 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ не відбувається припинення росту зародкових паростків; г) при C_m більше за $90,0 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ припиняється ріст зародкових корінців, однак, зважаючи на продовження приросту зародкових паростків, ці концентрації не є летальними для пшениці озимої; д) найбільша стійкість проростків пшениці до дії йонів Zn^{2+} виявляється при C_m у межах $0,5-1,5 \cdot 10^{-3}$ моль/м³, про що свідчать величини K_i за цих концентрацій; е) при C_m йонів Zn^{2+} на рівні $10,0 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ і більше коренева система проростків майже не галузиться, спостерігається викривлення і потемніння зародкових корінців, що вказує на істотний фітотоксичний вплив йонів цього металу на пшеницю озиму за даних умов.

Нікол входить до складу фермента уреазу, яка каталізує в рослинах процес розкладу сечовини до амоніаку і вуглекислого газу. Йони Ніколу активують ряд ферментів – нітратредуктазу, гідрогеназу та інші, здійснюють стабілізуючий вплив на структуру рибосом рослинних клітин, беруть участь у транспортуванні Нітрогену та забезпеченні ним тканин. Нестача Ніколу в ґрунті призводить до сповільнення темпів росту рослин і зменшення накопичення їх біомаси. Токсична дія Ніколу на рослини виявляється у пригніченні процесів фотосинтезу і транспірації, ознаках хлорозу листя, деформації частин рослини тощо. В умовах високих концентрацій йонів цього металу, насамперед, зупиняється ріст коренів рослин (табл. 3).

Таблиця 3. Результати дослідження впливу йонів Ni^{2+} у молярних концентраціях $0,5\text{--}100 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ на проростки пшениці озимої

C _м · 10 ⁻³ (моль/м ³)	Показники росту							
	зародкових корінців				зародкових паростків			
	l, мм		Δl, мм	K _i	l, мм		Δl, мм	Π _i
	до експ.	після експ.			до експ.	після експ.		
Дослідження 2015 року								
контроль	34,0	111,0	77,0	1,000	23,0	127,0	104,0	1,000
0,5	34,0	39,0	5,0	0,064	27,0	111,0	84,0	0,807
1,0	60,0	63,0	3,0	0,038	29,0	90,0	61,0	0,586
1,5	49,0	51,0	2,0	0,025	31,0	109,0	78,0	0,461
2,0	53,0	55,0	2,0	0,025	29,0	74,0	45,0	0,432
2,5	50,0	52,0	2,0	0,025	28,0	62,0	34,0	0,326
3,0	19,0	21,0	2,0	0,025	25,0	50,0	25,0	0,240
3,5	48,0	49,0	1,0	0,012	37,0	62,0	25,0	0,240
4,0	48,0	49,0	1,0	0,012	29,0	53,0	24,0	0,230
4,5	50,0	51,0	1,0	0,012	30,0	53,0	23,0	0,221
5,0	47,0	48,0	1,0	0,012	34,0	57,0	23,0	0,221
10,0	41,0	42,0	1,0	0,012	39,0	57,0	18,0	0,173
15,0	27,0	28,0	1,0	0,012	15,0	28,0	13,0	0,125
20,0	26,0	27,0	1,0	0,012	15,0	26,0	11,0	0,105
25,0	25,0	25,0	0	0,000	19,0	30,0	11,0	0,105
...								
50	25,0	25,0	0	0,000	15,0	20,0	5,0	0,048
Дослідження 2016 року								
контроль	31,4	151,8	120,4	1,000	26,6	176,4	149,8	1,000
55	31,6	31,6	0	0,000	28,6	35,0	6,4	0,043
...								
100	24,0	20,2	-3,8	0,000	30,8	33,1	2,3	0,015
K _i серед.				0,0099	Π _i серед.			0,1703

Узагальнимо ознаки впливу різних концентрацій йонів Ni^{2+} на проростки пшениці озимої: а) досліджувані молярні концентрації йонів Ni^{2+} не стимулюють ріст зародкових корінців і паростків; б) на рівні $0,5 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ спостерігається найбільша стійкість проростків пшениці до токсичної дії йонів Ni^{2+} , на що вказують відповідні величини K_i та P_i , в) при C_m у межах $25,0\text{--}100,0 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ відбувається повне гальмування росту зародкових корінців; г) при концентрації вищій за $50 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ виникає ламкість і потемніння зародкових корінців, вони не галузяться і набувають світло-коричневого забарвлення; паростки стають блідими із коричневою плямою в основі зародкового пагона; д) C_m йонів Ni^{2+} у межах $0,5\text{--}100,0 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ не є летальними для пшениці озимої, оскільки за цих концентрацій продовжується приріст зародкових паростків.

Порівняння гальмувальної дії йонів Купруму, Цинку і Ніколу на ріст зародкових корінців та паростків у межах досліджуваних молярних концентрацій дозволило встановити такий спадаючий ряд: Cu^{2+} (різке припинення росту зародкових корінців і паростків при $15 \cdot 10^{-3}$ моль/м³) > Ni^{2+} (різке гальмування росту лише зародкових корінців при $25 \cdot 10^{-3}$ моль/м³) > Zn^{2+} (поступове гальмування росту зародкових корінців у межах C_m $90 \cdot 10^{-3}$ моль/м³).

Фітотоксична дія досліджуваних йонів на проростки пшениці озимої послідовно зростає в такому порядку: Zn^{2+} ($K_{i \text{ серед.}} = 0,0866$; $P_i = 0,6382$) < Cu^{2+} ($K_{i \text{ серед.}} = 0,0171$; $P_i = 0,1832$) < Ni^{2+} ($K_{i \text{ серед.}} = 0,0099$; $P_i = 0,1703$).

Висновки та перспективи подальших досліджень

1) Фітотоксична дія йонів Купруму, Цинку і Ніколу на проростки пшениці озимої полягає в гальмуванні росту їх зародкових корінців і паростків, а також виявляється низкою візуальних ознак.

2) Зародкові корінці проростків цієї сільськогосподарської культури виявляють вибірккову стійкість до дії досліджуваних йонів важких металів – поступово зменшують приріст і припиняють свій ріст за дії йонів Купруму з C_m на рівні $15 \cdot 10^{-3}$ моль/м³, Ніколу з $C_m = 25 \cdot 10^{-3}$ моль/м³, Цинку з $C_m =$ вище $90 \cdot 10^{-3}$ моль/м³.

3) Приріст зародкових паростків проростків пшениці озимої поступово зменшується за дії йонів Ніколу і Цинку в межах досліджуваних концентрацій, натомість повністю припиняється за C_m Купруму на рівні 15 моль/л.

4) C_m йонів Cu^{2+} , Zn^{2+} і Ni^{2+} у межах $0,5\text{--}100 \cdot 10^{-3}$ моль/м³ не є летальними для пшениці озимої, оскільки навіть при відсутності приросту довжини проростків рослини не гинуть – спостерігається ефект їхнього консервування.

5) При дії досліджуваних концентрацій важких металів на пшеницю найбільший фітотоксичний вплив здійснюють йони Ni^{2+} і найменший – йони Zn^{2+} .

Подальші дослідження доцільно зосередити в напрямі встановлення летальних концентрацій досліджуваних йонів для проростків пшениці озимої.

Література

1. Водна культура [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://bibliograph.com.ua/bev/175.htm>.
2. Герасимчук Л. О. Біотестування в екологічних дослідженнях [Електронний ресурс] / Л. О. Герасимчук, Т. В. Кобильник, І. С. Минайлюк. – Режим доступу: <http://intkonf.org/gerasimchuk-lo-kobilnik-tv-minaylyuk-is-biotestuvannya-v-ekologichnih-doslidzhenniyah/>
3. Грабовський О. В. Акумуляція важких металів ґрунтом та рослинними об'єктами в умовах антропогенного навантаження / О. В. Грабовський, В. Г. Рошко, О. І. Ніколайчук. // Наук. вісник УжДУ. Сер. Біологія. – 2000. – № 8. – С. 158–160.

4. Заблоцька О. С. Реакція проростків пшениці озимої на дію мікроелементів (Cu^{2+} , Zn^{2+} , Ni^{2+}) в умовах водної культури / О. С. Заблоцька, Н. М. Опанащук // Агроекологічний журнал. – 2015. – № 4. – С. 90–96.
5. Іваненко О. В. Вплив органо-мінеральних добрив на накопичення важких металів вегетативними і генеративними органами пшениці ярої / О. В. Іваненко, О. В. Тогачинська, О. В. Ничик // Вісник ЖНАЕУ. – 2014. – № 1 (39), т. 1. – С. 44–50.
6. Мислива Т. М. Вплив поліметалічного забруднення на фітотоксичність дерново-підзолистого ґрунту / Т. М. Мислива, Л. О. Онопрієнко // Вісник ЖНАЕУ. – 2009. – № 1. – С. 137–146.
7. Надточій П. П. Міграція Cu, Zn, Pb, Cd в дерново-підзолистому ґрунті при різних рівнях імпактного поліметалічного забруднення / П. П. Надточій, Л. О. Герасимчук // Вісник ЖНАЕУ. – 2011. – № 2, т. 1. – С. 21–36.
8. 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.
9. 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).
10. Assessment of cadmium on wheat (*Triticum aestivum* L.) in hydroponics medium / [Saiba Idrees, Sumera Shabir, Noshin Ilyas, Nazima Batool, Sidra Kanwal] // Agrociencia : México nov./dic. – 2015. – Vol. 49. – P. 8–12.
11. Azevedo R. Phytotoxicity of mercury in plants / R. Azevedo, E. Rodriguez // A Review, J. Bot. – 2012. – 11 (5). – P. 1–10.
12. Bheemareddy V. S. Impact of Cadmium Phytotoxicity on Photosynthetic Rate and Chlorophyll Content in *Triticum aestivum* L. DWR 225 / V. S. Bheemareddy // Middle-East Journal of Scientific Research. – 2013. – 17 (9). – P. 1209–1212.
13. Karataglis S. Effect of heavy metals on isoperoxidases of Wheat / S. Karataglis, M. Moustakas, L. Symeonidis // Biologia Plantarum. – 1991. – Vol. 33, Issue 1. – P. 3–9.
14. Effect of lead stress on mineral content and growth of wheat (*Triticum aestivum*) and spinach (*Spinacia oleracea*) seedlings / Mostafa Lamhamdi, Ouia El Galiou, Ahmed Bakrim [et al.] // Saudi J. Biol Sci. – 2013. – 20 (1). – P. 29–36.
15. Ergun N. Effects of some heavy metals and heavy metal hormone interactions on wheat (*Triticum aestivum* L. cv. Gun 91) seedlings / N. Ergun, I. Oncel // Afri. J. Agric. Res. – 2012. – 7 (10). – P. 1518–1523.
16. Germination and seedling growth of corn (*Zea mays* L.) under varying levels of copper and zinc / [Mahmood S., Hussain A., Saeed Z., Athar M.] // Int. J. Environ. Sci. Tech. – 2005. – 2 (3). – P. 269–274.

17. Lamhamdi M. Phytotoxicity on Wheat (*Triticum aestivum* L.) Seed Germination and Seedlings Growth / Mostafa Lamhamdi, Ahmed Bakrim // *Comptes rendus biologiques*. – 2011. – 334 (2). – P. 118–26.

18. Oliveira H. Chromium as an environmental pollutant : Insights on induced plant toxicity / H. Oliveira // *J. Bot.* – 2012. – 1 (1). – P. 1–2.

19. Phytoavailability of toxic heavy metals and productivity in wheat cultivated under residual effect of fertilization in soybean culture / A. C. Goncalves, H. Nacke, D. Schwantes [et al.] // *Wat. Air Soil Pollut.* – 2011. – 7 (1B). – P. 69–73.

20. 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.

21. Singh D. Response of wheat seed germination and seedling growth under copper stress / D. Singh, K. Nath, Y. K. Sharma // *J. Environ. Bio.* – 2007. – 28 (2). – P. 409–414.

22. Mahmood T. Toxic effects of heavy metals on early growth and tolerance of cereal crops / T. Mahmood, K. R. Islam, S. Muhammad // *Pak. J. Bot.* – 2007. – 39 (2). – P. 451–462.
