

**ЕКОЛОГІЧНА ОЦІНКА РЕАКЦІЇ-ВІДГУКУ
ОЗИМИХ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР
НА ЗАБРУДНЕННЯ ҐРУНТУ ВАЖКИМИ МЕТАЛАМИ**

Вивчена реакція-відгук озимих зернових культур на забруднення ґрунту Cd, Pb і Zn за факторами врожайність, вміст важких металів в товарній частині та біохімічні показники якості зерна. Толерантність озимих до важких металів змінювалась в ряді: озимий ячмінь > озима пшениця > тритикале > озиме жито. Встановлено, що при низькому рівні забруднення можна вирощувати озимий ячмінь сорту Силует за умов усунення токсичності ґрунту методами хімічної детоксикації.

Постановка проблеми

Захист навколишнього середовища від забруднення в умовах зростаючого антропогенного пресингу на об'єкти біосфери набуває особливого значення в сільському господарстві. Порушення екологічної рівноваги в природі впливає на такі важливі складові агроєкосистеми, як ґрунт і рослина. Практично в усіх країнах з розвинутою промисловістю, у тому числі в Україні і, зокрема, у Придніпровському регіоні, в останні десятиліття спостерігається локальне нагромадження рухомих форм важких металів (ВМ) у ґрунті – основному біологічному адсорбенті та нейтралізаторі забруднення навколишнього середовища, що здатний зберігати токсичні речовини антропогенного походження тривалий час. Крім того, саме з ґрунту, акумулюючись в сільськогосподарських культурах, ВМ по трофічних ланцюгах надходять до організму тварин і людини, викликаючи різноманітні захворювання. Ведення землеробства на забруднених ВМ ґрунтах стає одним з актуальних практичних завдань для агроєкологів, адже вже зараз у результаті агрохімічного моніторингу в Дніпропетровській області виявлено близько 30 % орних земель з низьким і середнім ступенем забруднення. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми при низькому рівні забруднення є підбір культур-фітостабілізаторів, що не виносять ВМ і не накопичують їх у своїй біомасі. Тому виникла необхідність у визначенні толерантності озимих зернових культур до токсичної дії ВМ.

Аналіз основних публікацій та задачі досліджень

Межі токсичності ВМ розрізняються в сільськогосподарських культур і залежать від особливостей екскреторної можливості до поглинання, а також неоднакової дії хімічних елементів на процеси транслокації [1].

Токсична дія ВМ на рослини проявляється, у першу чергу, в ушкодженні клітинних мембран, зміні активності ферментів [2], інгібуванні росту коренів [3, 4], це сприяє виникненню цілого ряду вторинних ефектів; це: гормональний дисбаланс, порушення фотосинтезу, транспірації, біосинтезу білка, мінерального живлення, пересування фотоасиміляторів, що призводить до гальмування росту і розвитку, а в деяких випадках навіть – до загибелі рослин [2].

Толерантність рослин до ВМ пов'язана з активізацією в них комплексу захисних механізмів, серед яких виділяють зовнішні – не пов'язані з життєдіяльністю рослинного організму, які є наслідком властивостей ґрунту, здатних зменшувати потік іонів ВМ у рослину; і внутрішні, тобто ті, котрими володіє сама рослина [5].

Зовнішні захисні пристосування є наслідком буферних властивостей ґрунту, здатних зменшити потік іонів $ВМ^{2+}$ із ґрунтового розчину в рослини [6]; у випадку з чорноземом звичайним – це вміст органічної речовини та рухомого фосфору, рН та ін.

Механізм толерантності рослин (внутрішні захисні пристосування за Дж.Антоновичем (1971) полягає в наступному: компартаментация ВМ у клітинних стінках або вакуолях, зв'язування їх тіолмістячими білками, пептидами й органічними кислотами; зв'язування $ВМ^{2+}$ металотіонеїнами і фітохелатинами, що за допомогою меркаптидних комплексів здійснюють детоксикацію; посилення екскреції $ВМ^{2+}$ з рослин при гутації і відторгненні вегетативних органів; розвиток в організмі рослин адаптивних змін (пошук альтернативних метаболічних реакцій, зміна структури ферментів) [7].

На жаль, відомості щодо ступеня толерантності сільськогосподарських культур з урахуванням конкретного забруднювача та ґрунтових умов є досить неповними, тому головна мета полягала у визначенні стійкості озимих зернових культур до забруднення ґрунту ВМ. Для її досягнення вирішувались такі задачі:

- вивчення реакції-відгуку озимих зернових культур до токсичної дії ВМ за факторами врожайність та вміст політантів в зерні;
- визначення фітотоксичності ВМ;
- вивчення можливості використання толерантної культури як фіто-стабілізатора, забрудненого ВМ ґрунту за умов застосування меліорантів.

Об'єкти і методика досліджень

Об'єктом досліджень виступала реакція-відгук районованих сортів озимих зернових культур, що вирощуються в Дніпропетровській області,

на забруднення ґрунту ВМ.

Дослідження проводились протягом 2001–2007 рр. на Ерастівській дослідній станції Інституту зернового господарства УААН. Ґрунт – чорнозем звичайний малогумусний важкосуглинковий з наступними агрохімічними показниками: вміст гумусу (за І.В. Тюрнім) 3,5–4,0 %, загального азоту – 0,20–0,23, фосфору – 0,10–0,12, валовий вміст калію – 2,0–2,3 %. Кількість легкогідролізованого азоту (за І.В. Тюрнім і М.М. Коновою) – 10,0–11,4 мг на 100 г сухого ґрунту; за можливості поповнення його доступних форм за рахунок нітрифікаційної здатності (за Кравковим) – 2,4–2,8 мг на 100 г ґрунту. Вміст рухомих форм фосфору в орному шарі становить 8,8–9,8 мг, калію 14,3–15,4 мг у 100 г ґрунту (метод Ф.В. Чирикова). Валовий вміст мікроелементів та ВМ наступний: Zn – 38,8–40,4; Mn – 473,0–484,0; Cu – 12,5–14,2; Co – 8,0–8,3; Fe – 835,0–845,0; Pb – 32,4–33,1; Cd – 0,38–0,39 мг/кг ґрунту і відповідно рухомих форм, що складають невеликий відсоток від валових: рухомого Zn – 0,96–1,20; Cu – 0,13–0,15; Co – 0,42–0,48; Mn – 57,5–63,8; Fe – 27,6–28,0; Pb – 0,05–0,10; Cd – 0,10–0,11 мг/кг. Реакція ґрунтового розчину близька до нейтральної (рН 6,75).

Клімат північного Степу України помірно-континентальний з відносно холодною зимою (середня температура повітря січня за 2001–2007 рр. – 2,2 °С) та жарким літом (середня температура повітря липня за 2003–2005 рр. – +22,9 °С). Сума активних температур складає 2700–3600 °С, середньорічна сума опадів – 428,9 мм, а за вегетаційний період – 234,8 мм. Тривалість вегетаційного періоду з температурою вище +5 °С – 210–215, вище +10 °С – 150–155, а безморозного періоду – 155–160 днів. Погодні умови в роки проведення досліджень були сприятливими для росту і розвитку озимих зернових культур.

Реакцію-відгук озимих зернових до токсичної дії ВМ вивчали на фонах: 1 – без добрив, 4 – $\text{Naa}_{90}\text{Pcg}_{90}\text{Kкс}_{60}$. В орному шарі моделювали надзвичайно небезпечний рівень забруднення за В.Б. Ільїним (1995) у 5 ГДК. Аерогенне забруднення ґрунту здійснювали шляхом обприскування водними розчинами нітратних солей Cd, Pb та Zn з наступною заробкою в ґрунт на глибину орного шару восени під основний обробіток. У дослідах вивчалась реакція-відгук за факторами: врожайність, вміст ВМ в товарній частині, біохімічні показники якості зерна в озимій пшениці сорту Альбатрос одеський, тритикале – Амфідіплоїд 60, озимого жита – Кормове 61, озимого ячменю – Силует. Толерантність озимого ячменю сорту Силует перевірялась в мікропольовому досліді при застосуванні меліорантів (K_2CO_3 і K_2S) на ґрунтах з низьким рівнем забруднення (1,5 ГДК). Дозу внесення K_2CO_3 і K_2S визначали з розрахунку в 1,5 раза більше необхідної кількості для повного хімічного зв'язування катіонів VM^{2+} в ґрунті. Технологія вирощування озимих

зернових культур загальноприйнята для зони Північного Степу [8]. Площа забрудненої ділянки складала 1 м², ширина захисних смуг – 0,5 м, повторність досліду триразова.

У рослинних зразках визначали: азот, фосфор, калій за методом Гінзбург–Щеглової–Вульфюс; ВМ на атомно-абсорбційному спектрофотометрі; білок, жир, крохмаль, клітковину з використанням ІЧ експрес-аналізатора "Інфрапід-61".

Математична обробка експериментальних даних здійснювалась за методом дисперсійного аналізу згідно з методиками Б.А. Доспехова (1985) та Г.Ф. Лакіна (1990) з використанням пакета Excel-97.

Результати досліджень

Реакція-відгук озимих зернових культур на такий стрес-фактор, як забруднення ґрунту ВМ, зумовлювалась їх біологічними особливостями, а саме: будовою кореневої системи та більш тривалішим періодом вегетації.

Коренева система озимих розвивається на глибину до 1,5 м, причому основна її маса знаходиться в шарі 20–60 см, отже, тільки в шарі 20–30 см буде випробувати токсичну дію ВМ.

В озимих зернових культур життєвий цикл протікає в два періоди. Перший відбувається восени – від посіву до стійких заморозків, а другий починається навесні і завершується плодоношенням і відмиранням рослин. Між цими двома періодами озимі знаходяться в стані спокою. В осінній період в них інтенсивно росте коренева система і листова поверхня. В озимих культур, посіяних в оптимальний термін (10–20 вересня для Дніпропетровської області), при сприятливих погодних умовах кушення відбувається в основному восени. У фазі кушення коренева система досягає 50–60 см, тобто переростає забруднений ВМ шар (0–30 см). Крім того, у зимовий період, коли рослини знаходяться в стані спокою, відбувається закріплення ВМ²⁺ ГПК, зменшується їх рухомість, а, отже, і токсичність для озимих.

Навесні в період інтенсивного росту озимих, більша частина їх кореневої системи знаходиться вже нижче забрудненого ВМ шару (0–30 см), де міститься значно менша кількість рухомих форм ВМ. Як правило, в багатих на гумус ґрунтах катіони ВМ²⁺ практично не мігрують по профілю, за рахунок закріплення органічною речовиною в шарі 0–7 см – цілина, або в шарі 0–30 см – землі сільськогосподарського призначення. Крім того, за свідченням В.В. Таланової, А.Ф. Титова і Н.П. Бойової (2001), попередня обробка рослин ВМ індуціює підвищення їх внутрішніх захисних механізмів і дозволяє надалі без згубних наслідків переносити дію більш високих концентрацій цих токсикантів [4].

Загальним показником токсичної дії ВМ в озимих зернових культур був хлороз, а саме: знижувався зміст хлорофілу, що викликало більш бліде

забарвлення; також відбувалося скручування листя, пригнічувався ріст надземної та підземної частин рослини.

Рослини, вирощені на забруднених ВМ варіантах (фони 1 та 4), відставали у рості і розвитку, в них сповільнювалися темпи проходження окремих етапів органогенезу до 3–4 днів, порівняно з контрольним варіантом. Висота озимих зернових зменшувалась в середньому на 12–18 %, довжина колосся – на 9–11, число зерен у колосі – на 30–33, маса 1000 зерен – на 28–31 %, що призводило до зниження врожайності вивчаємих в досліді культур практично вдвічі.

Не дивлячись на триваліший період вегетації, більш високі значення рН ексудатів, добре розвинену кореневу систему, порівняно з іншими зерновими, врожайність озимих від впливом ВМ знижувалась у ячменя на 51,7–56,7 %, жита – 53,2–59,7 %, пшениці – 52,3–57,1 %, тритикале – 52,8–58 %.

Внесення мінеральних добрив ($N_{90}P_{90}K_{60}$) підвищувало врожайність озимих зернових культур: пшениці – на 18,2 %; ячменя – 20,5; жита – 13,2; тритикале – 9,5 (незабруднені варіанти).

Внесення мінеральних добрив як додаткового джерела живлення рослин стимулювало інтенсивний ріст кореневої системи у нижні, менш забруднені шари ґрунту, що призводило до збільшення їх врожайності на варіантах із ВМ. Отриманий приріст врожаю зерна озимої пшениці хоча і складав 2,3–3,1 ц/га, озимого жита – 2,3–2,7, озимого ячменю – 2,4–5,5, тритикале – 2,3–2,7 ц/га, однак був менше значень цього показника на контрольному варіанті (незабруднений ґрунт) із внесенням тієї ж дози мінеральних добрив ($N_{90}P_{90}K_{60}$).

Проте, окрім підвищення врожайності, внесення мінеральних добрив сприяло більш високому рівню накопичення ВМ у зерні озимих зернових культур (табл. 2). На жаль, крім основної діючої речовини мінеральні добрива містять у своєму складі, як домішки, ВМ і є одним з джерел надходження даних токсикантів до ґрунту. Аналіз мінеральних добрив показав, що їх хімічний склад багато в чому залежить від вихідної сировини і технології отримання [9]. Крім того, фізіологічно кислі мінеральні добрива сприяють підкисленню реакції ґрунтового розчину, що опосередковано призводить до збільшення рухомості ВМ, фосфорні добрива – навпаки – закріпленню ВМ у недоступній кореневій системі форми [10]. У нашому випадку сукупна дія від внесення мінеральних добрив ($Na_{90}P_{90}K_{60}$) проявлялася в більш сильному нагромадженні Cd, Pb і Zn в товарній частині рослин озимих зернових, порівняно до контрольного варіанту.

В зерні озимих зернових культур спостерігалось збільшення зольності на 2,4–3,8 % за рахунок накопичення ВМ, білка – на 2,2–5,1 % і нітратів – до 15,9 %. Високий рівень вмісту нітратів у зерні зумовлювався їх надлишковим вмістом у ґрунті, що пов'язано: по-перше, з додатковим

надходженням NO_3^- – супутнього аніона сполуки-забруднювача ($\text{BM}(\text{NO}_3)_2$), по-друге, з інгібуванням Cd, Pb та Zn процесу денітрифікації. Збільшення білка Г.А. Євдокимова (1993) пояснюється захисною реакцією білкових сполук, тобто їх участю в детоксикації BM^{2+} , які надійшли до клітини рослини.

Найбільший токсичний ефект за факторами врожайність, накопичення забруднювача в товарній частині культури і біохімічні показники якості зерна спричиняв Cd – елемент першого класу небезпеки. Середню позицію посів свинець, а найменш токсичним виявився цинк при забрудненні в 5 ГДК.

Проаналізувавши реакцію-відгук озимих зернових на забруднення ґрунту BM, слід зазначити, що найбільш толерантною культурою виявився озимий ячмінь сорту Силует. В мікропольовому досліді (2005–2007 рр.) була проведена перевірка його стійкості до токсичної дії BM на ґрунтах з низьким рівнем забруднення (1,5 ГДК) за умов застосування меліорантів (K_2CO_3 і K_2S). Як показали результати досліджень, врожайність озимого ячменю практично досягала контрольного варіанту і становила 34,3–35,8 ц/га, а вміст BM, хоча й був практично в два рази вище значень незабрудненого варіанту (Cd – 0,12–0,13 мг/кг, Pb – 0,37–0,39 мг/кг, Zn – 48,1–49,4 мг/кг), проте все ж знаходився в межах ГДК.

Висновок

Проведено оцінку реакції-відгуку озимих зернових культур, що вирощуються в Дніпропетровській області на токсичну дію BM за факторами: врожайність, накопичення BM у товарній частині та біохімічні показники якості зерна. Фітотоксичність BM змінювалась в ряді: Cd > Pb > Zn. За ступенем стійкості до токсичної дії Cd, Pb і Zn озимі зернові можна розмістити у виді наступного ряду: озимий ячмінь > озима пшениця > тритикале > озиме жито. Найбільш толерантною культурою слід визнати озимий ячмінь сорту Силует. При низькому рівні забруднення ґрунту в 1,5 ГДК цю сільськогосподарську культуру можна вирощувати на чорноземах звичайних, але за умов додаткового усунення токсичної дії BM методами хімічної детоксикації (внесення K_2CO_3 і K_2S).

Перспективи подальших досліджень

Потрібно зосередитися, по-перше, на пошуку толерантних до токсичної дії BM сільськогосподарських культур з метою розробки на їх основі сівозмін, а, по-друге, – на вивченні можливостей поєднання фітостабілізації з методами хімічної детоксикації токсикантів в ґрунті.

Таблиця 1. Токсичний вплив ВМ
на врожайність озимих зернових культур, ц/га

Сільськогосподарська культура	НОФ	Без забруднення (контроль)				Забруднення ВМ											
						Cd				Pb				Zn			
		2001	2002	2004	ср	2001	2002	2004	ср	2001	2002	2004	ср	2001	2002	2004	ср
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Озима пшениця Альбатрос одеський	1	43,2	39,8	53,4	45,5	19,6	17,2	21,8	19,5	20,5	20,2	21,6	20,8	21,0	21,6	22,4	21,7
	4	55,8	43,8	61,7	53,8	22,4	20,0	24,0	22,1	23,6	23,4	24,3	23,9	23,7	23,3	25,0	24,0
НСР _{0,95} , ц/га		1,7	1,9	0,9		1,0	0,8	1,2		1,3	1,1	0,8		0,6	1,3	1,0	
P, %		1,26	1,19	1,34		0,94	0,71	1,23		1,45	1,02	0,77		0,43	1,37	0,82	
Озимий ячмінь Силует	1	42,6	26,5	44,5	37,9	16,9	12,0	20,3	16,4	20,5	12,8	21,5	18,3	17,9	13,5	22,8	18,1
	4	49,2	34,2	51,9	45,1	25,7	15,8	24,2	21,9	20,7	16,3	24,9	20,7	22,5	17,5	26,6	22,2
НСР _{0,95} , ц/га		1,6	1,9	0,3		0,5	0,5	0,4		2,6	1,0	1,3		0,9	1,4	0,8	
P, %		1,01	1,90	0,15		0,40	0,61	0,28		2,06	1,17	0,88		0,71	1,44	0,51	
Тритикале Амфліп лойд	1	51,7	40,8	43,0	45,2	18,0	19,3	19,8	19,0	20,1	20,2	20,8	20,4	21,0	20,2	22,7	21,3
	4	56,2	45,1	47,2	49,5	20,0	20,3	21,0	20,4	21,5	22,0	22,2	21,9	22,9	23,1	23,5	23,2

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
НСР _{0,95} , ц/га		1,1	0,8	0,5		1,5	2,5	1,4		0,7	1,2	0,9		1,6	1,3	0,8	
Р, %		1,75	1,39	1,24		1,27	1,87	1,14		0,64	0,84	0,76		1,40	1,24	0,57	
Озиме жито Кормове 61	1	43,6	32,1	40,5	38,7	15,3	15,5	16,1	15,6	17,1	16,8	17,7	17,2	18,8	17,9	18,5	18,1
	4	49,7	38,0	43,6	43,8	17,1	16,7	17,3	17,0	19,8	19,4	20,4	19,9	20,4	20,1	20,6	20,4
НСР _{0,95} , ц/га		1,5	2,0	0,8		1,9	0,9	0,4		1,0	0,5	0,8		1,3	1,1	0,7	
Р, %		1,02	1,39	0,76		1,87	1,15	0,43		1,23	0,59	0,85		1,18	0,69	0,38	

Примітка: 1) ФОН 1 – без внесення добрив; ФОН 4 – N₉₀P₉₀K₆₀;

2) урожайні дані взяті за 2001, 2002 та 2004 рр., в зв'язку з несприятливими погодними умовами, що призвели до загибелі озимих у 2003 р.

Таблиця 2. Вміст ВМ в зерні озимих зернових культур
(середнє за 2001–2004 рр.), мг/кг

Сільськогосподарська культура	ФОН	Незабруднений ґрунт			Забруднений ґрунт		
		Cd	Pb	Zn	Cd	Pb	Zn
Озима пшениця	1	0,06	0,14	28,3	1,69	41,6	148,6
Альбатрос одеський	4	0,07	0,17	30,2	1,74	42,8	150,8
Озимий ячмінь	1	0,05	0,12	20,6	1,63	40,9	146,5
Силует	4	0,07	0,17	23,4	1,69	43,0	148,6
Тритикале	1	0,07	0,15	32,6	1,70	43,0	150,4
Амфідіплоїд 60	4	0,08	0,18	35,0	1,79	44,7	153,2
Озиме жито	1	0,06	0,12	39,0	1,77	44,2	152,5
Кормове 61	4	0,09	0,19	41,8	1,83	45,4	155,8
НСР _{0,95} , ц/га		0,01–0,02	0,02–0,03	0,8–1,1	0,03–0,08	0,4–0,9	1,1–1,8
P, %		0,88–1,34	0,73–1,06	0,52–,83	0,43–1,12	0,27–0,58	0,45–0,69
ГДК		0,20	2,00	50,0	0,20	2,00	50,0
МДР у кормах		0,30	5,00	50,0	0,30	5,00	50,0

Примітка: ФОН 1 – без внесення добрив; ФОН 4 – N₉₀P₉₀K₆₀

Література

1. Самохвалова В.Л., Мірошніченко М.М., Фатєєв А.І. Порогові рівні токсичності важких металів для сільськогосподарських культур // Вісник аграрної науки. – 2001. – № 11. – С. 61–65.
 2. Гуральчук Ж.З. Механизмы устойчивости растений к тяжелым металлам // Физиология и биохимия культурных растений. – 1994. – Т. 26. – № 2. – С. 107–115.
 3. Ковда В.А., Золотарева Б.Н., Скрипниченко И.И. О биологической реакции растений на тяжелые металлы в среде // Доклады Академии наук СССР. – 1979. – Т. 247. – № 3. – С. 766–768.
 4. Таланова В.В., Титов А.Ф., Боева Н.П. Влияние возрастающих концентраций тяжелых металлов на рост проростков ячменя и пшеницы // Физиология растений. – 2001. – Т. 48. – № 1. – С. 119–123.
 5. Фатеев А.И., Мірошніченко Н.Н., Самохвалова В.Л. Миграция, транслокация и фитотоксичность тяжелых металлов при полиэлементном загрязнении почвы // Агрохимия. – 2001. – № 3. – С. 57–61.
 6. Жеребная Л.А. Роль корневых систем в блокировании поступления тяжелых металлов в генеративные органы растений // Труды Междунар. конф. “Грунтознавство та агрохімія на шляху до сталого розвитку України”. – Книга 3 / Агрохімія та грунтознавство. – Вінниця, 2002. – С. 61–63.
 7. Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. – Л.: Агропромиздат, 1987. – 142 с.
 8. Система ведення сільського господарства Дніпропетровської області / За ред. В.С. Цикова. – Дніпропетровськ: Зоря, 2005. – 432 с.
 9. Агроэкологическая оценка применения минеральных удобрений в агроценозах кукурузы в условиях Степной зоны Украины / С.М. Крамарев, Л.Н. Скрипник, В.Е. Коваленко, Т.Ф. Яковишина, В.Н. Шевченко, В.П. Иванчиков // Агрохимия. – 2000. – № 2. – С. 67–72.
 10. Крамарев С.М., Шевченко В.Н., Яковишина Т.Ф. Эффективность фосфосодержащих удобрений в агроценозах кукурузы выращиваемой на техногенно загрязненных черноземах обыкновенных // Вісник аграрної науки Південного регіону / Сільськогосподарські та біологічні науки. – Одеса: СМІЛ, 2003. – Вип. 4. – С. 62–68.
-
-