



УДК 57.017.3: 546.48

## ІНДУКОВАНІ САЛІЦИЛАТОМ ЗМІНИ РОЗПОДІЛУ ВАЖКИХ МЕТАЛІВ У ПШЕНИЦІ ТА КУКУРУДЗИ ЗА ДІЇ КАДМІЮ ХЛОРИДУ

**М. С. Кобилецька**

Львівський національний університет імені Івана Франка  
вул. Грушевського, 4, Львів 79005, Україна  
e-mail: [biofr@franko.lviv.ua](mailto:biofr@franko.lviv.ua)

Досліджено вплив саліцилової кислоти (СК) на розподіл важких металів, які (окрім Cd), належать до мікроелементів, а саме: Cd, Fe, Mn, Zn і Cu у коренях і пагонах 28-добових рослин пшениці та кукурудзи за умов впливу кадмію хлориду в концентрації 25 мг на 1 кг субстрату. Встановлено, що СК у концентрації 0,5 мМ ініціювала підвищення акумуляції кадмію коренями *Zea mays* L. і зменшення надходження цього елемента у пагони рослин, можливо, через активування бар'єрних механізмів. Водночас у *Triticum aestivum* L. за дії СК спостерігали значне зниження акумуляції Cd коренями рослин. СК також спричинювала активне надходження Zn та Cu до листків. Вміст Mn за дії кадмію зростав у всіх варіантах, окрім пагонів *Triticum aestivum* L., сумісний вплив СК і кадмію знижував вміст Mn до рівня контролю. Кадмієвий стрес індукував зменшення вмісту Fe у тканинах обох досліджуваних видів рослин, тоді як сумісний вплив СК і CdCl<sub>2</sub> зумовлював збільшення вмісту цього елемента в пагонах рослин щодо контролю. Такі зміни у балансі металів свідчать про адаптивну роль СК, яка була видоспецифічною. Основною спільною рисою впливу СК на вміст металів у рослинах є посилення їхнього надходження до надземної частини рослин.

**Ключові слова** *Zea mays* L., *Triticum aestivum* L., саліцилова кислота, кадмій, мікроелементи.

### ВСТУП

Протягом кількох останніх десятиліть умови існування рослин стають дедалі менш сприятливими у зв'язку з глобальними процесами на Землі, як природними, так і антропогенними. Особливого значення у цьому разі набуває проблема стійкості рослин до абіотичних стресорів, зокрема, високих температур, нестачі води, засолення, впливу важких металів [9]. Відомо, що іони важких металів, серед яких кадмій посідає особливе місце внаслідок високої токсичності й широкої розповсюдженості, можуть справляти значний негативний вплив на метаболізм рослин, сповільнюючи їхній ріст і розвиток, спричиняючи різноманітні порушення метаболізму. Проте деякі важкі метали, зокрема купрум, цинк, ферум, манган, належать до

мікроелементів і в невисоких концентраціях необхідні для нормального розвитку рослин [15]. Зважаючи на це, набуває особливої актуальності пошук прийомів підвищення стійкості рослин до стресорів. Ефективним засобом для цього можуть бути природні сполуки та їхні штучні аналоги. До таких сполук можна віднести саліцилову кислоту (СК). СК нині розглядається як сполука, що поєднує властивості сигнальної молекули і фітогормону [20, 26].

Встановлено, що СК має здатність регулювати поглинання мінеральних елементів за стресових умов, знижувати рівень надходження токсичних іонів у організм рослин [7]. Також відомо, що СК зменшує руйнівний вплив важких металів на мембрани рослинної клітини [11, 21], проте механізми її дії на рослини в контексті індукування стійкості до абіотичних стресорів з'ясовані все ще не повністю [13].

Отже, метою нашої роботи було встановити вплив обробки насіння СК на нагромадження Cd, Fe, Mn, Zn і Cu у рослинах кукурудзи і пшениці, які вирощували за умов забруднення кадмію хлоридом.

## МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Дослідження проводили на рослинах пшениці (*Triticum aestivum* L.) сорту Поділька та кукурудзи (*Zea mays* L.) сорту Закарпатська жовта зубовидна. Насіння пшениці та кукурудзи стерилізували у 1% розчині калію перманганату протягом 10 хв та промивали дистильованою водою. Частину насіння замочували у 0,5 мМ розчині СК протягом 5 год, іншу частину замочували за аналогічних умов у дистильованій воді, потім пророщували за загальноприйнятою методикою. Після цього відбирали однорідні проростки та переносили їх на піщану культуру. Для створення умов забруднення кадмієм у відповідні варіанти вносили 25 мг солі  $\text{CdCl}_2$  на 1 кг субстрату. Концентрація була підібрана нами у попередніх дослідженнях як така, яка здійснює токсичний вплив на рослини, але не спричинює їхньої загибелі [2, 3]. Протягом вирощування рослин підтримували вологоємність субстрату 60–70 %, двічі на тиждень вносили 50 мл модифікованого розчину Хогланда (6,7 мМ  $\text{CaNO}_3 \times 4\text{H}_2\text{O}$ , 5 мМ  $\text{KNO}_3$ , 1,2 мМ  $\text{MgSO}_4$ , 1 мМ  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ , 1 мМ  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , 0,4 мМ  $\text{FeSO}_4$ , 0,4 мМ  $\text{Na}_2\text{EDTA} \times 2\text{H}_2\text{O}$ , 0,046 мМ  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 0,009 мМ  $\text{MnCl}_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ , 0,77 мкМ  $\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ , 0,32 мкМ  $\text{CuSO}_4 \times 5\text{H}_2\text{O}$ , 0,05 мкМ  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \times 4\text{H}_2\text{O}$ ). Рослини вирощували у контрольованих умовах освітлення (2,0–2,2 тис. лк), температури (22–23 °C), вологості (90–95 %) і в 16-годинному світловому режимі. На 28-му добу росту культур відбирали проби рослинного матеріалу для визначення вмісту важких металів, оскільки цей період був достатнім для поглинання, нагромадження і розподілу досліджуваних елементів мінерального живлення в органах рослин. Вміст Cd, Fe, Mn, Zn і Cu у рослинному матеріалі визначали в розчинах золи на атомно-абсорбційному спектрофотометрі “С-115 М1” (Україна) у повітряно-ацетиленовому полум’ї [28].

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ І ЇХНЕ ОБГОВОРЕННЯ

Хоча іони Cd не беруть участь у метаболізмі рослин за нормальних умов, вони легко поглинаються, транспортуються та нагромаджуються рослинами. Нагромадження іонів кадмію в органах рослин є видоспецифічним, здебільшого максимальний вміст цього елемента відмічають у коренях рослин, навіть у разі надходження кадмію через листки [12]. Вважають, що транспорт кадмію відбувається по флоемі. Іони кадмію спричиняють низку токсичних ефектів у організмі рослини [1].

У досліджуваних нами рослин пшениці та кукурудзи, що росли на піщаній культурі з вмістом кадмію хлориду 25 мг/кг протягом 28 діб, виявлено значне нагромадження кадмію в коренях. Зокрема, у рослинах пшениці відбулася значна акумуляція кадмію в коренях, де вміст його був у 12 разів вищим, ніж у надземній частині рослин. Проте вміст кадмію в коренях кукурудзи перевищував його вміст у пагонах лише вдвічі (табл. 1).

**Таблиця 1. Вміст кадмію в 28-добових рослинах *Triticum aestivum* L. і *Zea mays* L. за дії СК та іонів кадмію**

**Table 1. Content of cadmium in 28-days plants *Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L. under influence of salicylic acid and cadmium ions**

Варіант	Вміст кадмію, мкг/г сухої маси			
	<i>Triticum aestivum</i> L.		<i>Zea mays</i> L.	
	корені	пагони	корені	пагони
Контроль	6,59±0,30	4,08±0,09	3,54±0,16	2,21±0,05
СК	5,85±0,21	3,40±0,11	3,55±0,12	3,07±0,08
Кадмій	541,01±32,46**	44,21±1,68**	158,75±9,84**	74,18±3,10**
СК + Кадмій	147,20 ±6,63**	55,22±2,10**	186,66±6,83**	31,43±1,35**

**Примітки:** статистична вірогідність різниць: \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$  порівняно з контролем

**Comments:** statistical probability of differences: \* –  $p < 0.05$ ; \*\* –  $p < 0.01$  compared to control

Вплив саліцилової кислоти змінював перебіг акумуляції кадмію рослинами. У пшениці виявлено зниження вмісту кадмію в коренях на 73 %, тоді як у пагонах вміст кадмію підвищувався на 25 % (табл. 1). У дослідженнях інших авторів [22] також встановлено зниження вмісту кадмію під впливом саліцилату в *Triticum aestivum* L., але визначення вмісту кадмію в надземній частині рослин ними не проводилося.

Зазначимо, що за дії СК значно підсилювся транспорт кадмію від коренів до пагонів пшениці. Така реакція рослин може вважатися видоспецифічною, оскільки дослідження транспорту іонів Cd у *Triticum aestivum* L. показали, що у цього виду надходження кадмію в пагони є значно інтенсивнішим, ніж у інших представників роду *Triticum* [10].

Акумуляція кадмію в рослинах кукурудзи за дії СК має інші тенденції, ніж у пшениці. СК підвищила нагромадження кадмію коренями кукурудзи на 18 %, проте знизилася його вміст у пагонах більш ніж удвічі. Тобто за дії СК відбувся перерозподіл кадмію між органами в бік коренів (табл. 1).

Результати досліджень інших вчених щодо впливу СК на нагромадження кадмію рослинами є неоднозначними. У рослинах коноплі 0,5 мМ СК знижувала вміст кадмію в коренях і пагонах [24]. В експериментах із кукурудзою однією групою вчених показано зниження вмісту кадмію під впливом СК [25], інші виявили підвищення вмісту кадмію за умов впливу низьких концентрацій цього металу [14]. Незважаючи на відмінності в акумуляції кадмію рослинами за дії СК, у всіх наведених випадках спостерігали покращення росту рослин на кадміймісному середовищі.

Ферум є важливим елементом мінерального живлення для рослинного організму. Транспорт заліза відбувається по ксилемі, здебільшого у вигляді хелату

з цитратом. Іони феруму повільно транспортуються у тканинах, тому в молодих органах, що інтенсивно ростуть, часто відмічають його дефіцит [12].

Результати проведених ученими досліджень свідчать, що іони кадмію негативно впливають на поглинання і транспорт іонів феруму рослиною. Зворотна кореляція між вмістом Cd та Fe відмічена у коренях і листках рису [16].

За дії іонів кадмію на рослини пшениці нами виявлено зниження вмісту заліза на 30 % у коренях та на 56 % у пагонах. Транспорт іонів феруму від коренів до пагонів також знижувався під впливом кадмію (табл. 2).

У кукурудзи вплив кадмію на акумуляцію іонів феруму в тканинах був іншим: у коренях виявлено зниження вмісту Fe на 31 %, а у надземній частині його вміст зростав майже втричі. Також у *Z. mays* відмічено посилений відтік заліза до пагонів (табл. 2). Припускаємо, що описані відмінності є наслідком видової специфікації.

**Таблиця 2. Вміст феруму в 28-добових рослинах *Triticum aestivum* L. і *Zea mays* L. за дії СК та іонів кадмію**

**Table 2. Content of iron in 28-days plants *Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L. under influence of salicylic acid and cadmium ions**

Варіант	Вміст феруму, мкг/г сухої маси			
	<i>Triticum aestivum</i> L.		<i>Zea mays</i> L.	
	корені	пагони	корені	пагони
Контроль	27,42±0,88	0,77±0,02	9,95±0,53	0,38±0,04
СК	12,57±0,30**	0,49±0,01*	18,73±0,60*	0,59±0,02
Кадмій	19,08±0,71*	0,34±0,01**	6,89±0,19*	1,10±0,03*
СК + Кадмій	12,17±0,28**	1,46 ±0,06*	7,78±0,29	0,97±0,04*

**Примітки:** статистична вірогідність різниць: \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$  порівняно з контролем

**Comments:** statistical probability of differences: \* –  $p < 0.05$ ; \*\* –  $p < 0.01$  compared to control

Саліцилова кислота спричинювала посилення транспорту іонів Fe до листків у пшениці в 4,3 разу, а у кукурудзи за її дії підвищувався вміст Fe в коренях на 13 %, проте знижувався у пагонах (табл. 2). Про такий ефект СК на вміст заліза в органах рослин свідчать і дані літературних джерел. Сама СК по-різному впливала на акумуляцію Fe рослинами – підвищувала у кукурудзи та знижувала у пшениці. Про неоднорідний характер впливу СК на метаболізм феруму відомо й із праць інших дослідників [4].

Для взаємовпливу Cd-Fe, окрім того, характерно те, що надлишковий вміст заліза в середовищі підвищує стійкість рослин до дії кадмію, завдяки пришвидшенню росту рослин, збільшенню вмісту фотосинтетичних пігментів і підвищенню ефективності світлової фази фотосинтезу [23].

Манган, як й інші двовалентні катіони, легко абсорбується рослиною зі середовища, хоча загалом манган вважають низькомобільним елементом. Надлишковий вміст цього елемента призводить до токсичних ефектів: порушується активність ферментів і гормонів, а також посиленої акумуляції феруму [12].

У досліджуваних нами рослин кукурудзи виявлено підвищення вмісту мангану на 17 % у коренях і на 125 % в пагонах під впливом кадмію, тоді як у пшениці спостерігалось зростання вмісту Mn удвічі лише в коренях, а в надземній частині рослин вміст іона знижувався на 64 % (табл. 3).

У пшениці транслокація іонів мангану до пагонів виявилася пригніченою впливом кадмію, а у кукурудзи цей вплив лише підсилювався. Вплив СК наближував вміст марганцю в рослинах кукурудзи до контролю, але з тією відмінністю, що відбувся перерозподіл катіона в бік пагона. У пшениці вплив СК також стимулював значний відтік іонів мангану до пагонів. Сама СК спричиняла посилену акумуляцію марганцю рослинами (табл. 3).

**Таблиця 3. Вміст мангану в 28-добових рослинах *Triticum aestivum* L. і *Zea mays* L. за дії СК та іонів кадмію**

**Table 3. Content of manganese in 28-days plants *Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L. under influence of salicylic acid and cadmium ions**

Варіант	Вміст мангану, мкг/г сухої маси			
	<i>Triticum aestivum</i> L.		<i>Zea mays</i> L.	
	корені	пагони	корені	пагони
Контроль	69,19±2,42	41,59±1,62	47,20±1,27	37,80±1,59
СК	74,06±2,34	32,54±1,17	78,51±4,00*	84,37±2,95**
Кадмій	130,68±3,14**	14,89±0,63**	55,18±2,26	84,93±3,31**
СК + Кадмій	27,81±0,81**	77,52±3,18*	42,05±1,18	48,55±2,52

**Примітки:** статистична вірогідність різниць: \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$  порівняно з контролем

**Comments:** statistical probability of differences: \* –  $p < 0.05$ ; \*\* –  $p < 0.01$  compared to control

Із джерел літератури відомо [12], що Mn є антагоністом Fe, і важливим для життєдіяльності рослини є баланс цих елементів. Результати проведених досліджень свідчать, що співвідношення Mn : Fe змінюється під впливом кадмію в обох видах досліджуваних рослин. Зокрема, воно суттєво знижувалося в коренях та зростало у пагонах. Вплив саліцилату нормалізував цей показник від впливу кадмію, лише в пагонах кукурудзи це співвідношення катіонів було удвічі вищим щодо контролю. Загалом, такий вплив СК на акумуляцію Mn та Fe можна вважати позитивним для рослинного організму.

Рослини здатні легко поглинати розчинні форми цинку як у іонній, так і в гідратній та хелатній формах. В організмі рослини Zn зазвичай формує комплекси з розчинними низькомолекулярними білками, його вважають високомобільним. Іони цинку концентруються у зрілих листках, а у разі дефіциту можуть бути переміщені в інші частини рослини. Взаємодію Cd–Zn учені вважають суперечливою, адже знайдено докази як антагонізму, так і синергізму цих іонів. Причиною цього явища може бути те, що обидва іони транспортуються в рослинну клітину за допомогою тих самих білкових переносників [12].

У наших дослідженнях іони кадмію підвищували акумуляцію цинку в коренях пшениці у 2,5 разу та знижували його вміст у пагонах на 42 %. У кукурудзи відбулося зростання вмісту цинку за дії кадмію на 38 % у коренях і на 230 % у пагонах. Вплив саліцилату суттєво знижував надходження цинку в рослинний організм та спричиняв його відтік у пагін (табл. 4).

Таку реакцію рослинного організму на вплив СК можна вважати наслідком діяльності захисних механізмів.

Таблиця 4. Вміст цинку в 28-добових рослинах *Triticum aestivum* L. і *Zea mays* L. за дії СК та іонів кадмію

Table 4. Content of zinc in 28-days plants *Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L. under influence of salicylic acid and cadmium ions

Варіант	Вміст цинку, мкг/г сухої маси			
	<i>Triticum aestivum</i> L.		<i>Zea mays</i> L.	
	корені	пагони	корені	пагони
Контроль	44,61±1,25	29,50±0,74	84,49±3,55	16,75±0,87
СК	44,69±1,83	33,29±0,87	52,17±2,14	35,20±1,48
Кадмій	113,11±3,05**	17,10±0,33*	116,26±3,36*	55,18±1,99**
СК + Кадмій	24,73±0,92*	46,65±2,43*	36,98±1,59**	43,85±2,72**

**Примітки:** статистична вірогідність різниць: \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$  порівняно з контролем

**Comments:** statistical probability of differences: \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$  compared to control

Купрум також легко поглинається рослинами. Здебільшого іони купруму утворюють комплекси з протеїнами, у листках таким білком є пластоціанін. Іони Cu, подібно до Zn, акумулюються у розвинених органах рослини та повільно транспортуються до молодих. Із літературних джерел відомо, що антагоністами Cu вважають Fe, Cr, Zn та певною мірою Cd і Mn. Однак такі твердження не є однозначними, ця взаємодія видоспецифічна [12].

Наприклад, у наших дослідженнях виявлено різний вплив кадмію на акумуляцію купруму в органах рослин пшениці та кукурудзи. У пшениці спостерігали зростання вмісту Cu в 1,8 разу в коренях і його зниження втричі у пагонах. Тоді як у кукурудзи зменшувався вміст купруму в коренях в 1,8 разу та збільшувався в пагонах удвічі щодо контролю. Отже, вплив кадмію блокував транспорт купруму з коренів у пагони у *Triticum aestivum* L. та посилював його в *Zea mays* L. Вплив СК відновлював тенденцію розподілу міді в органах рослин подібно до контролю, проте все ж значення залишалися вищими (табл. 5).

Таблиця 5. Вміст купруму в 28-добових рослинах *Triticum aestivum* L. і *Zea mays* L. за дії СК та іонів кадмію

Table 5. Content of copper in 28-days plants *Triticum aestivum* L. and *Zea mays* L. under influence of salicylic acid and cadmium ions

Варіант	Вміст купруму, мкг/г сухої маси			
	<i>Triticum aestivum</i> L.		<i>Zea mays</i> L.	
	корені	пагони	корені	пагони
Контроль	6,51±0,19	1,97±0,09	5,54±0,23	2,66±0,12
СК	6,75±0,34	3,16±0,13	6,24±0,20	1,23±0,04
Кадмій	11,82±0,61	0,65±0,02	3,05±0,11	5,23±0,21
СК + Кадмій	10,51±0,30	3,95±0,17	8,50±0,35	4,87±0,16

**Примітки:** статистична вірогідність різниць: \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$  порівняно з контролем

**Comments:** statistical probability of differences: \* –  $p < 0,05$ ; \*\* –  $p < 0,01$  compared to control



## ВИСНОВОК

Загалом, аналізуючи вміст досліджуваних елементів у тканинах за дії кадмію та СК, чітко простежуємо відмінності між двома видами рослин. У *T. aestivum* разом із кадмієм активізувалося поглинання Mn, Zn і Cu. Зниження активності поглинання Fe коренями можна пояснити його конкуренцією за білки-транспортери із Cd. Разом із тим, вплив кадмію блокував надходження металів у пагони. Вплив СК характеризується послабленням акумуляції іонів металів коренями з одночасним активуванням їхнього транспорту в надземну частину рослин.

У *Z. mays* вплив кадмію спричинив протилежний ефект – надходження кадмію в кореневу систему вплинуло на зниження вмісту Fe, Zn і Cu, ймовірно, завдяки посиленому відтоку елементів, а також Mn, до надземної частини рослин. Встановлено, що СК ініціювала підвищення акумуляції кадмію коренями *Zea mays* L. і зменшення надходження цього елемента у пагони рослин, можливо, через активування бар'єрних механізмів. Водночас у *Triticum aestivum* L. за дії СК спостерігали значне зниження акумуляції Cd коренями рослин. СК також спричинювала активне надходження Zn та Cu до листків.

Такі зміни у балансі металів свідчать про адаптивну роль СК, яка є видоспецифічною. Незважаючи на те, що обидва досліджувані види рослин належать до одного класу – однодольних, важливою рисою відмінності між ними є тип фотосинтезу. Для кукурудзи властивий  $C_4$ -шлях фотосинтезу, тоді як для пшениці –  $C_3$ . Можна припустити, що й ця відмінність є причиною різної реакції обох видів рослин на вплив СК та кадмію хлориду. Проте основною спільною рисою впливу СК на вміст металів у рослинах є посилення їхнього надходження до надземної частини рослин, де вони необхідні для функціонування фотосинтетичного комплексу.

Із джерел літератури відомо, що важкі метали, зокрема й кадмій, змінюють функціональні властивості біологічних мембран. Іони цього металу здатні зв'язуватись із фосфатними групами компонентів мембран, спричинюють зміни їхнього ліпідного складу, активують процеси перекисного окиснення ліпідів, дестабілізують роботу мембранних каналів, порушують механізми іонного транспорту [5]. СК має властивість зменшувати поглинання і змінювати розподіл кадмію в рослинах, зберігаючи цілісність і стабільність мембран, знижує руйнівний вплив важкого металу на мембрани рослинної клітини [11, 17]. Відомо, що за дії СК надходження іонів ВМ зі середовища в організм рослини відбувається повільніше та у менших кількостях [6, 24]. Причиною цього може бути посилення під впливом СК виділення коренями цитрату й інших кислих компонентів ексудатів (зокрема, цитрату), які здатні зв'язувати іони важких металів ще у позакореновому середовищі [27].

Важливим бар'єром на шляху проникнення ВМ у рослинний організм є клітинна стінка. Відомо, що рослини можуть акумулювати значну частину ВМ саме у клітинних стінках [8]. Виявлено, що у відповідь на вплив СК відбувалося нагромадження калози в оболонках клітин [10, 18], що може сприяти посиленню бар'єрної функції клітинної стінки щодо іонів кадмію.

Зміни процесів акумуляції та перерозподілу іонів кадмію, нормалізація надходження у рослину мінеральних елементів, а також активація специфічних та неспецифічних адаптивних реакцій під впливом саліцилату, виявлені нами у попередніх дослідженнях [3, 19], створюють сприятливе середовище для відновлення метаболічної активності рослин за умов стресу кадмієм.

1. Benavides M.P., Gallego S.M., Tomaro M.L. Cadmium toxicity in plants. **Brasilian Journal of Plant Physiology**, 2005; 17: P. 21–34.
2. Boiko I.V., Kobyletska M.S., Terek O.I. Salicylic acid as growth regulator for cadmium-stressed plants. **Bulletin of Lviv University. Biol. Series**, 2012; 58: P. 271–279.
3. Boiko I.V., Kobyletska M.S., Terek O.I. Functional status of chlorophyll-protein complexes in leaves of plants influenced by cadmium ions and salicylate. **Studia Biologica**, 2011; 5(1):105–112. (In Ukrainian).
4. Drazic G., Mihailovic N. Modification of cadmium toxicity in soybean seedlings by salicylic acid. **Plant Science**, 2005; 168: 511–517.
5. Elloumi N., Zouari M., Chaari L. et al. Effects of cadmium on lipids of almond seedlings (*Prunus dulcis*). **Botanical Studies**, 2014; 55: 1–9.
6. Eraslan F., Inal A., Gunes A. et al. Impact of exogenous salicylic acid on the growth, antioxidant activity and physiology of carrot plants subjected to combined salinity and boron toxicity. **Scientia Horticulturae**, 2007; 113: 120–128.
7. Gunes A., Inal A., Alpaslan M. et al. Effects of exogenously applied salicylic acid on the induction of multiple stress tolerance and mineral nutrition in maize (*Zea mays* L.). **Archives of Agronomy and Soil Science**, 2005; 51: 687–695.
8. Hall J.L. Cellular mechanisms for heavy metal detoxification and tolerance. **Journal Experiment Botany**, 2002; 53:1–11.
9. Hart J. J., Welch R. M., Norvell W. A. et al. Characterization of cadmium binding, uptake, and translocation in intact seedlings of bread and durum wheat cultivars. **Plant Physiology**, 1998; 116: 1413–1420.
10. Hirano Y., Walther L., Brunner I. Callose in root apices of European chestnut seedlings: a physiological indicator of aluminium stress. **Tree Physiology**, 2006; 26: 431–440.
11. Ivanova A., Krantev A., Stoyanova Z. et al. Cadmium-induced changes in maize leaves and the protective role of salicylic acid. **General and Applied Plant Physiology**, 2008; 34: 149–158.
12. Kabata-Pendias A., Pendias H. **Trace elements in soils and plants**. Boca Raton: CRC Press, 2010. 548 p.
13. Kolupaev Yu. Ye., Yastreba T.O., Shvidenko M.V. et al. Influence of salicylic and succinic acids on formation of active oxygen forms in wheat coleoptiles. **The Ukrainian Biochemical Journal**, 2011; 5: 82–88. (In Ukrainian).
14. Krantev A., Yordanova R., Janda T. et al. Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants. **Journal of Plant Physiology**, 2008; 165: 920–931.
15. Lal N. Molecular mechanisms and genetic basis of heavy metal toxicity and tolerance in plants. In: Ashraf M., Ozturk M., Ahmad M. S. A. (Ed.) **Plant adaptation and phytoremediation**. Berlin: Springer, 2010: 35–58.
16. Liu J.G., Liang J.S., Li K.Q. et al. Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress. **Chemosphere**, 2003; 52: 1467–1473.
17. Liu Z., Ding Y., Wang F. et al. Role of salicylic acid in resistance to cadmium stress in plants. **Plant Cell Reports**, 2016; 35(4): 719–731.
18. Lockhart J. Surviving the onslaught: salicylic acid regulates plasmodesmata closure during pathogen attack in *Arabidopsis*. **The Plant Cell**, 2013; 25(6): 1911.
19. Luchkiv O.M., Terek O.I., Kobyletska M.S. The content of low molecular weight component of antioxidant system in corn and wheat seedlings under the action of salicylate and inoculation *Fusarium graminearum* Schwabe. **Physiology and Biochemistry of Cultivated Plants**, 2013; 45(3): 238–245. (In Ukrainian).
20. Lugova G.A., Kolupaev Yu.E., Karpets Yu.V. Participation of signal mediators in realization of stressprotective influence of exogenous jasmonic and salicylic acids on plant cells. **Plant Physiology and Genetics**, 2014; 46(1): 82–87. (In Russian).



21. Mishra A., Choudhuri M. Effects of salicylic acid on heavy-metal induced membrane deterioration mediated by lipoxygenase in rice. **Biologia Plantarum**, 1999; 42: 409–415.
22. Moussa H.R., El-Gamal S.M. Role of salicylic acid in regulation of cadmium toxicity in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Acta Agronomica Hungarica**, 2009; 57: 321–333.
23. Shao G., Chen M., Wang W. et al. Iron nutrition affects cadmium accumulation and toxicity in rice plants. **Plant Growth Regulation**, 2007; 53: 33–42.
24. Shi G.R., Cai Q.S., Liu Q.Q. et al. Salicylic acid-mediated alleviation of cadmium toxicity in hemp plants in relation to cadmium uptake, photosynthesis, and antioxidant enzymes. **Acta Physiologiae Plantarum**, 2009; 31: 969–977.
25. Szalai G., Pal M., Horvath E. et al. Investigations on the adaptability of maize lines and hybrids to low temperature and cadmium. **Acta Agronomica Hungarica**, 2005; 53: 183–196.
26. Wang L.-J., Fan L., Loescher W. et al. Salicylic acid alleviates decreases in photosynthesis under heat stress and accelerates recovery in grapevine leaves. **BMC Plant Biology**, 2010, 10: 34–43.
27. Yang Z.-M., Wang J., Wang S.-H. et al. Salicylic acid-induced aluminium tolerance by modulation of citrate efflux from roots of *Cassia tora* L. **Planta**, 2003, 217: 168–174.
28. Zyrin N.G., Malahov S.G. (Ed.) **Methodical recommendations for conducting field and laboratory studies of soil and plants in the control of environmental pollution metals**. Moscow: Hidrometeoizdat, 1981. 45–73 p.

## CHANGES INDUCED BY SALICYLATE IN DISTRIBUTION OF HEAVY METALS IN WHEAT AND CORN PLANTS UNDER THE INFLUENCE OF CADMIUM CHLORIDE

**M. S. Kobyletska**

*Ivan Franko National University of Lviv, 4, Hrushevskyi St., Lviv 79005, Ukraine  
e-mail: biofr@franko.lviv.ua*

The effect of salicylic acid (SA) on the distribution of heavy metals belonging to the microelements (except Cd) namely: Cd, Fe, Mn, Zn and Cu in roots and shoots of 28-day wheat and corn plants in the conditions of influence of cadmium chloride in the concentration of 25 mg per 1 kg of substrate was investigated. It was established that SA (0.5 mM) initiated an increase in accumulation of cadmium by roots of *Zea mays* L. and reduction of the flow of this elements in shoots of plants. It was possible due to activation of the barrier mechanisms. Simultaneously, it was observed at the action of SA a significant decrease of Cd accumulation by plant roots in *Triticum aestivum* L. took place. Also SA led to an active transportation of Zn and Cu to the leaves. The content of Mn at the action of cadmium increased in all variants except *Triticum aestivum* L. shoots, while joint influence of SA and cadmium reduced Mn content to the level of control. Cadmium stress has resulted a reduction of Fe in the tissues of both studied species of plants, whereas joint influence of the SA and CdCl<sub>2</sub> predetermined increasing of this element in the shoots of plants comparing to control. These changes in the balance of metals indicate the adaptive role of the SA, which was species specific. The main common feature of the SA influenced content of metals in plants is an increase of their uptake by the above ground parts of plants. Changes in processes of accumulation and redistribution of cadmium ions, normalization of transportation of mineral elements in plant create a supportive environment for recovery of metabolic activity of plants under stress effect caused by cadmium.

**Keywords:** *Zea mays* L., *Triticum aestivum* L., salicylic acid, cadmium, microelements.

## ИНДУЦИРОВАННЫЕ САЛИЦИЛАТОМ ИЗМЕНЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РАСТЕНИЯХ ПШЕНИЦЫ И КУКУРУЗЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ХЛОРИДА КАДМИЯ

**М. С. Кобылецкая**

Львовский национальный университет имени Ивана Франко  
ул. Грушевского, 4, Львов 79005, Украина  
e-mail: biofr@franko.lviv.ua

Исследовано влияние салициловой кислоты (СК) на распределение тяжелых металлов, которые (кроме Cd) принадлежат к микроэлементам, а именно: Cd, Fe, Mn, Zn и Cu в корнях и побегах 28-суточных растений пшеницы и кукурузы в условиях влияния хлорида кадмия в концентрации 25 мг на 1 кг субстрата. Установлено, что СК в концентрации 0,5 мМ инициировала возрастание аккумуляции кадмия корнями *Zea mays* L. и уменьшение поступления этого элемента в побеги растений, возможно, благодаря активированию барьерных механизмов. В то же время в *Triticum aestivum* L. при действии СК наблюдали значительное снижение аккумуляции Cd корнями растений. СК также вызывала активное поступление Zn и Cu в листья. Содержание Mn под влиянием кадмия возрастало во всех вариантах, кроме побегов *Triticum aestivum* L., совместное влияние СК и кадмия снижало содержание Mn до уровня контроля. Кадмиевый стресс индуцировал уменьшение содержания Fe в тканях обоих исследованных видов растений, тогда как совместное влияние СК и CdCl<sub>2</sub> приводит к увеличению этого элемента в побегах растений относительно контроля. Такие изменения в балансе металлов свидетельствуют об адаптивной роли СК, которая была видоспецифической. Основной общей чертой влияния СК на содержание металлов в растениях является усиление их поступления в надземную часть растений. Изменение процессов аккумуляции и перераспределения ионов кадмия, нормализация поступления в растение минеральных элементов создают благоприятную среду для восстановления физиологической и метаболической активности растений в условиях стресса кадмием.

**Ключевые слова:** *Zea mays* L., *Triticum aestivum* L., салициловая кислота, кадмий, микроэлементы.

Одержано: 07.06.2016