



Науковий вісник Львівського національного університету
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького

Scientific Messenger of Lviv National University
of Veterinary Medicine and Biotechnologies

ISSN 2519–2698 print
ISSN 2518–1327 online

doi: 10.15421/nvlvet8403
<http://nvlvet.com.ua/>

UDC 631.95:631.445.2

Features of Cadmium absorption by plants of spring barley

N. Kachmar, I. Foremna, A. Dydiv

Lviv National Agrarian University, Dubliany, Ukraine

Article info

Received 8.01.2018
Received in revised form
15.02.2018
Accepted 22.02.2018

Lviv National Agrarian University,
V.Velykyi, str., 1, Dubliany, Lviv
region, Zhovkva district, 80381,
Ukraine
Tel.: +38-098-096-02-69
E-mail: kachmarnatali@ukr.net

Kachmar, N., Foremna, I., & Dydiv, A. (2018). Features of Cadmium absorption by plants of spring barley. Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. 20(84), 16–20. doi: 10.15421/nvlvet8403

The paper present result of research on the intensity of the absorption of cadmium from the soil by plants barley. The object of the study were plant spring barley varieties Peas in various stages of development. Cadmium was added to the soil (dark-grey podzolic) as a $CdCl_2 \cdot 2,5H_2O$ in the concentration of 3, 15 and 30 mg Cd^{2+} per kg of the soil. Cadmium is one of the heavy metals which occur in the environment as a result of antropogenic activities. The best solution for maintaining non-contaminated soils and plants is to remove the sources of Cd in the environment. Given that that is essentially impossible at this time, further research needs to determine how soil and plant factors affect Cd availability on polluted soils. Of all non-essential heavy metals, Cadmium (Cd) is perhaps the metal that has attracted the most attention in soil science and plant nutrition due to its potential toxicity to humans, and also its relative mobility in the soil-plant system. The Cadmium is for plants completely unnecessary element. Of particular concern for humans are the high concentrations of Cd in grain. Established that the Cadmium content in barley amended as follows: underground faction > vegetative biomass fraction > generative fraction (control and on the variant of contamination of soil in a dose 3 mg Cd^{2+} per kg of the soil) and underground faction > generative fraction > vegetative biomass fraction (on the variants of experience 5 and 10 maximum possible concentration of Cd^{2+}). Cadmium absorbed most intensive barley in the flowering stage. Cadmium is characterized by subzero migratory ability in theorgans of barley. Roots are the main accumulators of this heavy metal. Every stress conditions are signal for a plant to initiate in its cells a number of different biochemical processes (e.g. changes of cytoplasm pH, changes of electrostatic potential of cell membranes, flow of ions). It is set that getting a clean straw and clean grain is possible only on the variants of experience 1 maximum possible concentration of Cd^{2+} and on control. The effect of cadmium and other heavy metals on plants depends not only on its form, but also on the presence and concentration of other elements and substances, the plant species and its developmental stage are also important. Several soil conditions, such as the pH value, calcium level, content of organic substances, particularly humus etc., are decisive for the exchangeable and water soluble, available cadmium for plants.

Key words: cadmium, soil, plant, roots, vegetative biomass fraction, grain, flowering stage, phase full ripeness, migration, accumulation.

Особливості біологічного поглинання Кадмію рослинами ячменю ярого

Н.В. Качмар, І.В. Форемна, А.І. Дидів

Львівський національний аграрний університет, м. Дубляни, Україна

У статті наведені результати досліджень щодо інтенсивності поглинання з ґрунту Кадмію рослинами ячменю. Об'єктом дослідження були рослини ячменю ярого сорту Пеас на різних стадіях розвитку. До темно-сірого опідзоленого ґрунту було внесено солі кадмію у вигляді $CdCl_2 \cdot 2,5H_2O$ у концентраціях: 3; 15 і 30 мг/кг ґрунту. Кадмій є одним з важких металів, які потрапляють у навколишнє середовище в результаті антропогенної діяльності. Досліджуваній полютант не входить до числа життєво необхідних для рослин елементів. Встановлено, що вміст Кадмію у ячмені зменшується таким чином: підземна фракція > вегетативна фракція фітомаси > генеративна фракція (на контролі та на варіанті забруднення ґрунту в дозі 1 ГДК Cd^{2+}) та підземна фракція > генеративна фракція > вегетативна фракція фітомаси (на варіантах дослідів 5 і 10 ГДК Cd^{2+}). Найінтенсивніше Кадмій поглинався ячменем у фазі цвітіння. Основним місцем накопичення цього важкого металу є корені. Будь-які стресові умови є сигналом для того, щоб рослина розпочала в своїх клітинах ряд різних біохімічних процесів (наприклад, зміни рН цитоплазми, зміни електростатичного потенціалу клітинних мембран, потоку іонів). Встановлено, що отримати чисту солому та безпечне зерно можливо лише на варіанті дослідів 1 ГДК Cd^{2+} та на контролі. Ефект кадмію та інших важких металів на рослини залежить не тільки від

його форми, а також і від наявності та концентрації інших елементів і речовин, виду рослини і її стадії розвитку також важливі. Деякі ґрунтові умови, такі як рН, вміст кальцію, вміст органічних речовин, зокрема гумусу і т. д., відіграють вирішальну роль, регулюючи доступність Кадмію для рослин.

Ключові слова: Кадмій, ґрунт, рослина, корені, вегетативна фітомаса, зерно, фаза сходів, фаза цвітіння, фаза повної стиглості, міграція, акумуляція.

Вступ

Однією з глобальних проблем людства є забезпечення якісними екологічно безпечними продуктами харчування. Стан довкілля став визначальним фактором, від якого залежить якість продукції та її кількість. Добре розвинутий у минулих роках аграрний сектор у Львівській області залишив «небезпечний спадок» для сьогодення, адже у фосфорних добривах міститься найбільша концентрація важких металів та інших токсикантів (Andreiko and Lozovytska, 2007; Gutyj et al., 2016). У зв'язку з цим є гостра потреба вивчення та прогнозування наслідків забруднення ґрунтів металом, який належить до першого класу небезпеки, – Кадмієм. Кадмій не входить до числа життєвонеобхідних для рослин елементів, проте ефективно ними поглинається і стає причиною зміни якості продукції навіть за умови, якщо високі концентрації металу не чинять негативного впливу на врожай сільськогосподарських рослин. Для Кадмію характерне значне його накопичення в генеративних органах рослини. Наявність у рослин адаптивного потенціалу до ряду чинників природного середовища пов'язана з наявністю у них морфоанатомічних, фізіологічних, генетичних та біохімічних механізмів, які об'єднані в достатньо цілісну систему. Саме ці механізми відіграють основну роль при захисті рослиного організму в разі виникнення певного стресу (Küpper et al., 2000; Benavides et al., 2005; Koziakova, 2002; Makrushyn et al., 2006; Kabata-Pendias, 2010; Irfan et al., 2013; Irfan et al., 2014; Zhao et al., 2016).

Наслідком тривалого надходження в організм людини Кадмію є: захворювання нирок та кісток, печінки, підшлункової залози, підвищення артеріального тиску, розвивається захворювання ітай-ітай, «кадмієва нежить», «кадмієва облямівка», порушується обмін заліза і кальцію (Uetani et al., 2005; Al-Azemi et al., 2010; Gutyj et al., 2017).

Тому дослідження інтенсивності накопичення Кадмію рослинами ячменю ярого, за різного рівня забруднення ним ґрунту, є актуальними і становлять значний науковий та практичний інтерес.

Метою дослідження було вивчення особливостей ячменю ярого щодо його стійкості в умовах імпактного забруднення Кадмієм у зоні західного Лісостепу України.

Для досягнення поставленої мети вирішувались такі завдання:

- вивчити закономірність та інтенсивність нагромадження Кадмію рослинами ячменю ярого за різних рівнів забруднення темно-сірого опідзоленого ґрунту.

Матеріал і методи досліджень

Дослідження інтенсивності біологічного поглинання Кадмію рослинами ячменю ярого було проведено методом польових досліджень. Як тест-культура

вивчався ячмінь ярий (*Hordeum sativum distichum*), пивоварний сорт «Пеяс» (в Україні посіви ячменю займають друге місце після пшениці та широко використовуються людиною). Дослідження проводили на темно-сірому опідзоленому ґрунті. Закладання та проведення польових досліджень проводили відповідно до загальноприйнятих методик. Площа однієї облікової ділянки становила 2 м². Ділянки розташовані рендомізовано, повторність п'ятиразова. Екотоксикологічна оцінка важкого металу проводилась в умовах імпактного забруднення, яке передбачає одноразове внесення поллютанта у досліджуваний ґрунт. Як забруднювач використовували солі CdCl₂·2,5H₂O, які одноразово вносили окремо у ґрунт на глибину 0 – 20 см у кількостях 1; 5 і 10 ГДК валових форм (Dosphehov, 1965; Lykhochvor and Petrychenko, 2006).

Посів та вирощування тест-культури здійснювали відповідно до технології, яка рекомендована в даній зоні (Lykhochvor and Petrychenko, 2006). Досліджували інтенсивність поглинання Кадмію рослинами ячменю у фазі сходів, цвітіння та повної стиглості. Вміст Кадмію у рослині визначали у коренях, надземній масі, зерні.

Вміст Кадмію у зразках рослин (після мінералізації, в муфельній печі типу FCF 12 SP, за ГОСТ 26929-86) визначали за допомогою приладу С115М методом атомно-абсорбційної спектроскопії. Інтенсивність біологічного поглинання Кадмію оцінювали за допомогою коефіцієнта біологічного поглинання (КБП). Для оцінки якості зернової продукції за вмістом важкого металу використовували загальноприйняті ГДК.

Результати та їх обговорення

Нами встановлено, що рослини ячменю нагромаджують Кадмій у різних кількостях залежно від його концентрації у досліджуваному ґрунті та фази онтогенезу рослини.

У фазі сходів, яка є визначальним періодом усього наступного процесу росту і розвитку рослини, вміст Кадмію у загальній фітомасі ячменю у 1-й рік дослідження, коливався від 0,33 (контроль) до 4,50 (10 ГДК Cd²⁺) мг/кг абсолютно сухої речовини. Із кожним наступним роком вміст металу у тест-рослині зменшувався і на 3-й рік дослідження значення досліджуваного показника (1 ГДК Cd²⁺) перебував на одному рівні з контролем, а на варіанті досліду 10 ГДК Cd²⁺ – зменшився в 3 рази (табл. 1).

Досліджувані нами концентрації Кадмію у ґрунті не стали причиною зупинки росту рослин на даній фазі розвитку. З літературних джерел відомо, що значне відставання рослини у рості і розвитку у фазі сходів відмічене при забрудненні ґрунту в концентрації 400 мг/кг, а при 800 і 1000 мг/кг припиняється ріст рослини (Koziakova, 2002; Abratowska, 2006).

Таблиця 1

Концентрація Кадмію в ячмені ярого залежно від рівня забруднення ґрунту, мг/кг абсолютно сухої речовини

Варіант	Рік	Концентрація					
		фаза сходів загальна фітомаса	фаза цвітіння		фаза повної стиглості		
			корені	солома	корені	солома	зерно
Конт- роль	1-й	0,33 ± 0,009	0,62 ± 0,02	0,11 ± 0,004	0,42 ± 0,02	0,089 ± 0,004	0,04 ± 0,001
	2-й	0,37 ± 0,01	0,69 ± 0,02	0,099 ± 0,004	0,43 ± 0,02	0,081 ± 0,003	0,04 ± 0,002
	3-й	0,35 ± 0,01	0,65 ± 0,02	0,098 ± 0,004	0,40 ± 0,01	0,085 ± 0,003	0,04 ± 0,001
1 ГДК Cd ²⁺	1-й	0,64 ± 0,02 ****	1,25 ± 0,04 ****	0,21 ± 0,009 ****	0,83 ± 0,03 ****	0,18 ± 0,007 ****	0,13 ± 0,006 ****
	2-й	0,47 ± 0,02*	0,92 ± 0,04 ***	0,17 ± 0,007 ****	0,52 ± 0,02 *	0,13 ± 0,005 ****	0,06 ± 0,003 ****
	3-й	0,32 ± 0,01	0,75 ± 0,03 **	0,12 ± 0,006	0,43 ± 0,02	0,09 ± 0,004	0,04 ± 0,002
5 ГДК Cd ²⁺	1-й	2,97 ± 0,15 ****	5,58 ± 0,32 ****	0,48 ± 0,02 ****	4,12 ± 0,21 ****	0,35 ± 0,02 ****	0,41 ± 0,02 ****
	2-й	1,02 ± 0,05 ****	2,11 ± 0,11 ****	0,38 ± 0,02 ****	1,14 ± 0,08 ****	0,26 ± 0,01 ****	0,28 ± 0,02 ****
	3-й	0,70 ± 0,04 ****	1,58 ± 0,08 ****	0,34 ± 0,02 ****	1,31 ± 0,06 ****	0,29 ± 0,01 ****	0,22 ± 0,01 ****
10 ГДК Cd ²⁺	1-й	4,50 ± 0,28 ****	10,44 ± 0,61 ****	0,69 ± 0,03 ****	8,12 ± 0,49 ****	0,59 ± 0,03 ****	0,71 ± 0,03 ****
	2-й	2,11 ± 0,12 ****	3,24 ± 0,18 ****	0,51 ± 0,02 ****	2,92 ± 0,16 ****	0,45 ± 0,02 ****	0,53 ± 0,02 ****
	3-й	1,35 ± 0,07 ****	2,28 ± 0,12 ****	0,45 ± 0,02 ****	2,04 ± 0,10 ****	0,40 ± 0,02 ****	0,37 ± 0,02 ****
ГДК						0,3	0,1

Примітка. * - $P < 0,01$, ** - $P < 0,025$, *** - $P < 0,002$, **** $P < 0,001$

Найбільша кількість Кадмію була зосереджена в коренях (на усіх варіантах дослідження), найменша – в зерні (контроль та 1 ГДК Cd²⁺). В. Странд стверджує, що процес надходження речовин у рослину регулюється генетично, але для злакових культур, наприклад для ячменю і кукурудзи, характерний жорсткіший «генетичний контроль», тому в зерні акумулюється значно менша кількість металів порівняно з коренями (Abratowska, 2006; Hrebela et al., 2008). Проте на варіантах дослідження 5 і 10 ГДК Cd²⁺ вміст забруднювача вищий у зерні, а не у солоні. Літературні джерела також підтверджують, що Кадмій, на відміну від інших металів, може, навпаки, накопичуватися у відносно більших кількостях у зерні зернових культур. Сільськогосподарські рослини не мають здатності вибірково поглинати хімічні елементи при високому рівні їхнього вмісту в кореневмісному шарі ґрунту. За таких умов спостерігається накопичення їх як у вегетативних, так і у генеративних органах рослин, оскільки корені нездатні повністю перекрити попадання надлишку металу у ксилему (Koziaikova, 2002; Abratowska, 2006; Andreiko and Lozovytska, 2007).

Концентрація Кадмію в зерні ячменю ярого не перевищувала існуючої ГДК впродовж усього періоду дослідження на варіантах дослідження 1 ГДК Cd²⁺ і на контролі. Відмічена і гігієнічна чистота соломи ячменю на цих варіантах.

Із додатковим внесенням забруднювача у ґрунт (5 ГДК Cd²⁺) його вміст у зерні зріс до 0,41 мг/кг абсолютно сухої речовини у 1-й рік дослідження. В наступні два роки цей показник суттєво знижувався, проте залишався вищим за допустиму концентрацію Кадмію у зерні в середньому у 2 рази. Найбільше

перевищення ГДК Кадмію виявлено у зерні ячменю ярого, вирощеного на ґрунті із внесеною кількістю поллютанта в дозі 10 ГДК його валових форм. Якщо порівняти вміст забруднювача у зерні впродовж років дослідження відносно ГДК, то у 1-й рік це число перевищувало ГДК у 7 разів, у 2-й рік – у 5 разів і у 3-й рік – у 4 рази. На даному варіанті відсоток кадмію у зерні від усієї поглинутої його кількості усією рослиною у 1-й рік становив 7,53%.

Згідно літературних джерел, зниження урожайності зернових настає при вмісті Кадмію 5 мг/кг (Abratowska, 2006). Проте в наших дослідженнях у рослинах такої концентрації Кадмію не виявлено. Однак ці дози виявились цілком достатніми для того, щоб вміст Кадмію у зерні в кілька разів перевищував ГДК, а це, відповідно, унеможливило використання такого зерна в харчових цілях.

Для зерна значення КБП Кадмію на контролі залишалося незмінним впродовж усіх років дослідження. На варіанті із забрудненням ґрунту в дозі 10 ГДК цей показник був вищим від контролю у 1-й і 2-й рік на 20%, а на 3-й рік значення даного показника знижувалося нижче від рівня КБП на контролі.

Найменша кількість Кадмію локалізувалася у вегетативній фітомасі – від 0,11 до 0,69 мг/кг (із загальної кількості у фітомасі 0,73 – 11,13) у фазі цвітіння та 0,08 – 0,59 мг/кг (із загальної кількості у фітомасі 0,54 – 9,42) у фазі повної стиглості (табл. 1). Аналізуючи міграцію поллютанта у системі «ґрунт-рослина» в динаміці за фенофазами, варто зазначити, що найбільша частина питомої ваги елемента, поглиналася з ґрунту у фазі цвітіння. Збільшення кількості Кадмію у солоні є наслідком додаткового його внесення у ґрунт. Вміст

забруднювача в даній частині рослини зменшувався на усіх досліджуваних варіантах з кожним наступним роком. Порівняно з контролем вміст кадмію у вегетативній фітомасі (у фазі повної стиглості 1-й рік) на варіанті 10 ГДК Cd^{2+} був у 6,6 раза більший; у 3,9 раза на варіанті 5 ГДК Cd^{2+} і вдвічі на варіанті 1 ГДК Cd^{2+} . На 2-й і 3-й рік вміст Кадмію у вегетативній фітомасі практично не змінювався на контролі, але поступово зменшувався на інших варіантах.

Аналіз отриманих даних дає можливість стверджувати, що при забрудненні ґрунту Кадмієм у дозі 5 і 10 ГДК Cd^{2+} вміст його в зерні та соломі був вищим за його допустиму концентрацію в цих частинах рослини, а тому слід у період вегетації та заготівлі зерна і кормів звертати увагу на цей момент.

На основі проведених досліджень встановлено, що коренева система є головним фактором, який обумовлює зниження надходження поллютантів у генеративні органи ячменю ярого.

Найбільшим вмістом Кадмію характеризувалася підземна фітомаса, яка містила Кадмію від 0,62 до 10,44 мг/кг (загальна кількість у фітомасі 0,73 – 11,13 мг/кг) у фазі цвітіння та від 0,42 до 8,12 мг/кг (загальна кількість у фітомасі 0,54 – 9,42 мг/кг абсолютно сухої речовини) у фазі повної стиглості (табл. 1). Вміст кадмію у коренях збільшувався відповідно до підвищення його вмісту у ґрунті. Так, відносно контролю кадмію у фазі повної стиглості у 1-й рік в підземній фітомасі на варіанті забруднення ґрунту в дозі 10 ГДК було у 19,3 раза більше; у 9,8 раза на варіанті – 5 ГДК Cd^{2+} і майже вдвічі на варіанті – 1 ГДК Cd^{2+} . У наступні роки ця різниця показника суттєво зменшувалася як у фазі цвітіння, так і у фазі повної стиглості.

У наступні два роки дослідження концентрація кадмію у коренях залишалася практично незмінною на контрольному варіанті. На варіанті досліді – 10 ГДК Cd^{2+} цей показник у 2-й рік зменшився порівняно з 1-м роком на 35,9% і на 24,8% у 3-й рік. Загалом за три роки досліджень у коренях акумулювалося від 81,06% (10 ГДК Cd^{2+}), 78,9% (5 ГДК Cd^{2+}) до 73,8% (1 ГДК Cd^{2+}) Кадмію від усєї поглинутої його кількості цілою рослиною.

Характер розподілу Кадмію в рослині зумовлений наявністю в кореневій системі ряду морфологічних структур і хімічних реакцій. До них відносять: поясок Каспарі, обмінну ємкість коренів, органічні сполуки, які виділяються коренями, вакуолярне депо. Ці особливості рослини дозволяють їй частково механічно затримувати метали або їх адсорбувати на стінках клітин (Koziakova, 2002; Makrushyn et al., 2006; Abratowska, 2006).

Механізм переносу важких металів із коренів у надземні частини рослин ще до кінця не вивчено. Відомо лише, що здебільшого малорозчинні солі важких металів переміщуються по судинній системі у вигляді комплексних сполук, можливо, з органічними кислотами типу лимонної (Hrebela et al., 2008).

Найвищим значенням КБП Кадмію характеризувались корені рослин ячменю з варіанта досліді 10 ГДК Cd^{2+} у 1-й рік дослідження. У 3-й рік досліджень цей показник, навпаки, характеризувався найнижчим

значенням показника відносно інших варіантів (контроль включно). За три роки КБП знизився на 72%. Тенденція до зниження значення даного показника з кожним роком є характерна і для інших варіантів досліді. За весь період тест-культурою було винесено з ґрунту 57,3% Кадмію – 5 ГДК Cd^{2+} , а на варіанті 10 ГДК Cd^{2+} – 53,7% від початкової його кількості у ґрунті.

Ми вважаємо, що для ячменю ярого мінімальну ГДК Кадмію в темно-сірому опідзоленому ґрунті, слід встановити на рівні вмісту рухомого Кадмію – 1,50 мг/кг. Цю цифру необхідно враховувати при вирощуванні ячменю на досліджуваному ґрунті, щоб отримати екологічно безпечну продукцію.

Варто пам'ятати, що хоча протягом довгого періоду рослини виробили механізми, які використовуються нею для протидії негативному впливу інших елементів, але вони не здатні в умовах високого рівня забруднення ґрунту захистити свій організм від потрапляння у нього різного виду поллютантів.

Висновки

Встановлено, що при різних концентраціях важкого металу у ґрунті солома ячменю не завжди була більш забруднена, ніж зерно. На варіантах досліді 5 і 10 ГДК Cd^{2+} його вміст зменшувався таким чином: підземна фракція > генеративна фракція > вегетативна фракція фітомаси, тимчасом як на варіанті забруднення ґрунту в дозі 1 ГДК Cd^{2+} і на контролі: підземна фракція > вегетативна фракція фітомаси > генеративна фракція.

Отримані дані щодо вмісту Кадмію в коренях свідчать про низьку міграційну здатність даного металу в органах ячменю. Найінтенсивніше Кадмій поглинався ячменем у фазі цвітіння.

Отже, результати досліджень показують, що лише на варіанті досліді, де ґрунт забруднений в дозі 1 ГДК Cd^{2+} , можливо отримати безпечну продукцію ячменю ярого. Зерно з варіантів досліді, де ґрунт забруднений в дозі 5 і 10 ГДК Cd^{2+} характеризувалося кількаретовим перевищенням значення ГДК.

Перспективи подальших досліджень. Результати проведених досліджень мають практичне значення і можуть бути використані для забезпечення екологічної безпеки під час вирощування ячменю ярого на забруднених ґрунтах. На основі отриманих результатів встановлено рівні захисних бар'єрів ячменю ярого. Тому планується подальше проведення досліджень щодо інтенсивності міграції та акумуляції найбільш розповсюджених поллютантів в сільськогосподарських культурах.

References

- Abratowska, A. (2006). The plant species adapted to growth on soils polluted by heavy metals. *Armeria maritime – Kosmos*. 55(2), 217–227.
- Al-Azemi, M., Omu, F.E., Kehinde, E.O., Anim, J.T., Oriowo, M.A., & Omu, A.E. (2010). Lithium protects against toxic effects of cadmium in the rat testes. *J. Assist. Reprod. Genet.* 27, 469–476. doi: 10.1007 /

s10815-010-9426-3

- Andreiko, L.V., & Lozovytska, T.M. (2007). Fitotoksychni vlastyvyosti svyntsiu ta kadmiu v systemi «grunt-roslyna» v umovakh shtuchnoho zabrudnennia gruntu tsymy metalamy. *Materialy nauk.-prakt. konf. molodykh vchenykh*. K.: In-t ahroekolohii UAAN, 97–99 (in Ukrainian).
- Benavides, M.P., Gallego, S.M., & Tomaro, M.L. (2005). Cadmium toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. 17(1), 21–34. doi: 10.1590/S1677-04202005000100003
- Dospheov, B.A. (1965). *Metodika polevogo opyta: uchebnyk*. M. : Agropromizdat (in Russian).
- Gutyj, B., Lavryshyn, Y., Binkevych, V., Binkevych, O., Paladischuk, O., Strons'kyj, J., & Hariv, I. (2016). Influence of «Metisevit» on the activity of enzyme and nonenzyme link of antioxidant protection under the bull's body cadmium loading. *Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. 18, 2(66), 52–58. doi:10.15421/nvlvet6612
- Gutyj, B., Stybel, V., Darmohray, L., Lavryshyn, Y., Turko, I., Hachak, Y., Shcherbatyy, A., Bushueva, I., Parchenko, V., Kaplaushenko, A., & Krushelnytska, O. (2017). Prooxidant-antioxidant balance in the organism of bulls (young cattle) after using cadmium load. *Ukrainian Journal of Ecology*, 7(4), 589–596. doi: 10.15421/2017_165
- Gutyj, B.V., Mursjka, S.D., Hufrij, D.F., Hariv, I.I., Levkivska, N.D., Nazaruk, N.V., Haydyuk, M.B., Priyma, O.B., Bilyk, O.Y., & Guta, Z.A. (2016). Influence of cadmium load ing on the state of the antioxidant system in the organism of bulls. *Visnyk of Dnipropetrovsk University. Biology, ecology*. 24(1), 96–102. doi:10.15421/011611
- Hrebena, N., Szatanik-Kloc, A., & Sokołowska, Z. (2008). Wpływ jonów kadmu na pozorną powierzchnię właściwą korzeni jęczmienia (*hordeum vulgare* L). *Acta Agrophysica*. 12(2), 337–345.
- Irfan, M., Ahmad, A., & Hayat, S. (2014). Effect of cadmium on the growth and antioxidant enzymes in two varieties of *Brassica juncea*. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 21(2), 125–131. doi: 10.1016/j.sjbs.2013.08.001
- Irfan, M., Hayat, S., Ahmad, A., & Alyemeni, M.N. (2013). Soil cadmium enrichment: Allocation and plant physiological manifestations. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 20(1), 1–10. doi: 10.1016/j.sjbs.2012.11.004
- Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace Elements in Soils and Plants*. Boca Raton: Cre Press.
- Koziakova, N.O. (2002). Ekotoksychnyi vplyv vazhkykh metaliv (Cd, Pb, Cu, Zn) na systemu «grunt-roslyna» v umovakh Polissia ta Lisostepu Ukrainy: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. s.-h. nauk. K., 17 (in Ukrainian).
- Küpper, H., Lombi, E., Zhao, F.J., & McGrath, S.P. (2000). Cellular compartmentation of cadmium and zinc in relation to other elements in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*. *Planta*. 212(1), 75–84. doi: 10.1007/s004250000366
- Lykhochvor, V.V., & Petrychenko, V.F. (2006). *Roslynyntstvo. Suchasni intensyvni tekhnolohii vyroshchuvannia osnovnykh polovykh kultur*. Lviv: Ukr. tekhnolohii (in Ukrainian).
- Makrushyn, M.M., Makrushyna, Ye.M., Peterson, N.V., & Melnykov, M.M. (2006). *Fiziolohiia roslyn: pidruchnyk*. Vinnytsia: Nova kn. (in Ukrainian).
- Uetani, M., Kobayashi, E., Suwazono, Y., Okubo, Y., Honda, R., Kido, T., & Nogawa, K. (2005). Selenium, cadmium, zinc, copper, and iron concentrations in heart and aorta of patients exposed to environmental cadmium. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 75(2), 246–250. doi: 10.1007/s00128-005-0744-6
- Zhao, Y.L., Zhang, C.B., & Liu, Z.Q. (2016). Inhibiting Cadmium Transport Process in Root Cells of Plants: A Review. *Journal of Agricultural Resources and Environment*. 2016;33(3):209–213. doi: 10.13254/j.jare.2016.0011