

ВПЛИВ ІОНІВ КАДМІЮ, НІКЕЛЮ, ХРОМУ ТА ЦИНКУ НА СТІЙКІСТЬ ГІБРИДІВ КУКУРУДЗИ НА ПОЧАТКУ ЮВЕНІЛЬНОГО ЕТАПУ РОЗВИТКУ РОСЛИН

Гришко В.М.¹, Лисенко О.І.¹, Ахмедова В.В.²

¹Криворізький ботанічний сад Національної академії наук України
вул. Маршака, 50, 50089, м. Кривий Ріг

²Криворізька гімназія №5 Криворізької міської ради
вул. Тарапаківська, 28, 50019, м. Кривий Ріг

vit.gryshko@yahoo.com, olyalis080991@gmail.com, etoyavictoria@gmail.com

Досліджено вплив важких металів на сільськогосподарські культури. в Останнім часом значну увагу привертають проблеми захисту довкілля, пов'язані не лише з промисловими забрудненнями, але й з екологічними наслідками воєнних дій на терені України.

Вивчено впливи іонів кадмію, нікелю, хрому та цинку на стійкість гібридів кукурудзи на початку ювенільного етапу розвитку рослин. Досліди проводили в наступних варіантах: контроль (дистильована вода); 1 ГДК $Cd^{2+}+Ni^{2+}+Zn^{2+}+Cr^{6+}$; 5 ГДК $Cd^{2+}+Ni^{2+}+Zn^{2+}+Cr^{6+}$; 5 ГДК $Cd^{2+}+Ni^{2+}+10$ ГДК $Zn^{2+}+Cr^{6+}$; 5 ГДК $Cd^{2+}+Cr^{6+}+10$ ГДК $Zn^{2+}+Ni^{2+}$; 10 ГДК $Cd^{2+}+Ni^{2+}+5$ ГДК $Zn^{2+}+Cr^{6+}$; 10 ГДК $Cd^{2+}+Cr^{6+}+5$ ГДК $Zn^{2+}+Ni^{2+}$ і 10 ГДК $Cd^{2+}+Ni^{2+}+Zn^{2+}+Cr^{6+}$. Під час досліджень означено, що ГДК $Ni^{2+}-4$; $Zn^{2+}-23$; $Cd^{2+}-3$ і $Cr^{6+}-6$ мг/л. Перші три іони вносили у вигляді водних розчинів сульфатів, а хром – $K_2Cr_2O_7$. Загальною закономірністю для всіх п'яти гібридів було пригнічення процесу проростання насіння з підвищенням концентрації іонів металів, тоді як іони за мінімальних концентрацій або не впливали на схожість насіння (гібриди ДМС Триумф, ДМС Орion, ДМ Петрос і ДМС Корал), або підвищували її (гібриди ДМ Петрос та ДМ Експенсів). Доведена металоспецифічність дії іонів високонебезпечних (кадмію та цинку) металів, яка проявляється в більшому пригніченні схожості зернівок, коли кадмій присутній у максимальній концентрації, порівняно з відповідними варіантами для іонів цинку. Також для гібридів ДМС Триумф, ДМ Експенсів та ДМС Корал встановлено більшу статистично достовірну негативну дію на схожість насіння, коли Cd^{2+} і Cr^{6+} знаходяться в максимальній концентрації на тлі 5ГДК Zn^{2+} і Cr^{6+} , або 5 ГДК Zn^{2+} і Ni^{2+} , тоді як для гібридів ДМС Орion і ДМ Петрос не встановлено значущої різниці між цими варіантами дослідів. За мінімального вмісту іонів металів у середовищі вирощування гібриди розподілились на 2 групи: до першої, для проростків якої характерне зменшення довжини головного кореня, і відповідно значень кореневого індексу, належать гібриди ДМ Експенсів, ДМ Петрос і ДМС Корал. Для гібридів другої групи (ДМС Орion, ДМС Триумф) не встановлено статистично достовірного зменшення довжини головного кореня. У проростків гібридів ДМС Орion, ДМС Корал, ДМ Експенсів і ДМС Триумф значення довжини кореня у варіанті 10ГДК $Cd^{2+}+Cr^{6+}+5$ ГДК $Zn^{2+}+Ni^{2+}$ статистично достовірно не відрізнялися від варіанту, коли іони металів були у максимальній концентрації, тобто призводили до однакового найбільшого негативного ефекту, на відміну від інших варіантів дослідів, коли іони кадмію і цинку були в максимальній концентрації на тлі менших концентрацій Ni^{2+} і Cr^{6+} . *Ключові слова:* гібриди кукурудзи, хром, нікель, кадмій, цинк, схожість насіння, довжина кореня, токсичність.

The effect of cadmium, nickel, chromium and zinc ions on the stability of maize hybrids at the beginning of the juvenile stage of plant development. Gryshko V., Lysenko O., Akhmedova V.

The study of the impact of heavy metals on agricultural crops has recently attracted more and more attention not only in connection with industrial pollution, but also with the ecological consequences of military actions on the territory of Ukraine. The article analyzes the results of studying the influence of Cd^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cr^{6+} on the stability of corn hybrids at the beginning of the juvenile stage of plant development. Experiments were carried out in the following variants: control (distilled water); 1 MPC $Cd^{2+}+Ni^{2+}+Zn^{2+}+Cr^{6+}$; 5 MPC $Cd^{2+}+Ni^{2+}+Zn^{2+}+Cr^{6+}$; 5 MPC $Cd^{2+}+Ni^{2+}+10$ MPC $Zn^{2+}+Cr^{6+}$; 5 MPC $Cd^{2+}+Cr^{6+}+10$ MPC $Zn^{2+}+Ni^{2+}$; 10 MPC $Cd^{2+}+Ni^{2+}+5$ MPC $Zn^{2+}+Cr^{6+}$; 10 MPC $Cd^{2+}+Cr^{6+}+5$ MPC $Zn^{2+}+Ni^{2+}$ and 10 MPC $Cd^{2+}+Ni^{2+}+Zn^{2+}+Cr^{6+}$. In the experiments, it was believed that MPC $Ni^{2+}-4$; $Zn^{2+}-23$; $Cd^{2+}-3$ and $Cr^{6+}-6$ mg/l. The first three ions were introduced in the form of aqueous solutions of sulfates and chromium – $K_2Cr_2O_7$. The general regularity for the hybrids was inhibition of the process of seed germination with an increase in the concentration of metal ions, while ions at minimum concentrations either did not affect seed germination (DMS Triumph, DMS Orion, DM Petros and DMS Koral) or increased it (DM Petros and DM Ekspensiv). The metal specificity of the action of highly dangerous Cd and Zn ions is proven, which is manifested in a greater inhibition of grain germination when Cd^{2+} is present in the maximum concentration compared to the corresponding variants for Zn ions. Also, for DMS Triumph, DM Ekspensiv and DMS Koral, a greater statistically reliable negative effect on seed germination was established when Cd^{2+} and Cr^{6+} are in maximum concentration against the background of 5 MPC Zn^{2+} and Cr^{6+} , or 5 GDK Zn^{2+} and Ni^{2+} , while for DMS Orion and DM Petros no significant difference was found between these variants of experiments. According to the minimum content of metal ions, the hybrids were divided into 2 groups: the first, the seedlings of which are characterized by a decrease in the length of the main root, and accordingly, the values of the root index, belong to DM Ekspensiv, DM Petros and DMS Koral. For the hybrids of the second group (DMS Orion, DMS Triumph) no statistically significant decrease in the length of the main root was established. In the seedlings of DMS Orion, DMS Koral, DM Ekspensiv and DMS Triumph, the root length in the variant of 10 MPC $Cd^{2+}+Cr^{6+}+5$ MPC $Zn^{2+}+Ni^{2+}$ did not statistically significantly differ from the variant when metal ions were in the maximum concentration, that is, they led to the same greatest negative effect, unlike in other variants of experiments, when cadmium and zinc ions were in the maximum concentration against the background of lower concentrations of Ni^{2+} and Cr^{6+} . *Key words:* maize hybrids, chromium, nickel, cadmium, zinc, seed germination, root length, toxicity.

Постановка проблеми. Забруднення довкілля є актуальним питанням для України, оскільки вміст важких металів у багатьох регіонах перевищує гранично допустимі концентрації (ГДК) [1]. Значні концентрації важких металів унаслідок міграційних процесів надходять із ґрунту і акумулюються у продукції рослинництва суттєво погіршуючи її якість [3–5]. Також необхідно враховувати, що у зв'язку з негативними наслідками для довкілля продовження активних воєнних дій на території України підвищується вірогідність подальшого вилучення посівних площ для отримання рослинної сільськогосподарської продукції. Водночас деякі важкі метали у мінімальних кількостях необхідні для здійснення біохімічних і фізіологічних процесів у рослин. За нестачі цих металів порушується ріст і розвиток рослин [1]. У світі близько п'ятої частини вирощеної кукурудзи використовується для задоволення технічних потреб людини і ця частка співставна з продовольчими потребами людини [6]. Для України кукурудза є однією з провідних зернових культур і її частка в зерновому балансі країни в останні роки значно перевищує виробництво пшениці та соняшнику [7].

Тому доцільним є розглядати можливість вирощування цієї культури для технічних потреб на площах, що мають незначний рівень надлишку певних елементів. Актуальність досліджень у цьому напрямку полягає в оцінці можливості використання гібридів кукурудзи вітчизняної селекції, які можуть вирощуватись на таких площах. Одним з найуразливіших періодів формування проростків є проростання насіння на початку ювенільного етапу розвитку рослин. Метою роботи було визначити стійкість гібридів кукурудзи в цей період до сумісної надлишкової дії іонів хрому, кадмію, нікелю та цинку.

Актуальність досліджень та аналіз останніх досліджень і публікацій. Значну увагу наукової спільноти продовжують привертати питання впливу важких металів на фізіологічні процеси в рослинах. Зазначене пов'язане, в першу чергу, з визначенням ролі певних елементів у підвищенні продуктивності основних продовольчих культур шляхом збалансування їх мінерального живлення. По-друге, процеси індустріалізації як в промисловості, так і в сільському господарстві призвели до значного прискорення мобілізації та міграції важких металів у літосфері, атмосфері і гідросфері та включення до рослинного компоненту екосистем, що спричинює потрапляння в трофічні ланцюги [8, 9].

Тому актуальним є вивчення ролі елементів, які на сьогодні вважаються неесенціальними (Cd, Cr та ін.) на ріст та розвиток рослин, особливо коли вони присутні в надлишковій кількості. До сьогодні більшість робіт була присвячена вивченню акумуляції та можливих фізіологічних ефектів окремих елементів, тоді як їх поліелементне надходження розглядалось в доволі обмеженій кількості робіт. Вивчення впливу Cd²⁺, Cr⁶⁺, Cu²⁺, Ni²⁺ та Zn²⁺ на люцерну довели, що

за концентрації 10 мг/л Cd²⁺ і Cr⁶⁺ та 20 мг/л Cu²⁺ і Ni²⁺ вони істотно впливали на показники схожості насіння та приріст біомаси, тоді як Zn²⁺, навіть за вмісту в поживному середовищі 40мг/л, не змінював схожість насіння [10]. Внесення до середовища вирощування 3мг/л Cd²⁺ і 4 мг/л Ni²⁺ показало, що гібриди кукурудзи відзначаються дещо вищою стійкістю до сумісного впливу сполук порівняно із сортами гороху. Вивчення особливостей акумуляції Ni²⁺ і Cd²⁺ до коренів проростків кукурудзи дозволило довести, що останній до 2,8 разів надходить в тканини кореня швидше, ніж Ni²⁺ [11]. Наші попередні дослідження свідчать, що у проростків кукурудзи на початкових етапах їх онтогенетичного розвитку на приріст головного кореня та надземної частини, утворення сирі та сухої маси спостерігається більший до 15% негативний вплив іонів нікелю, ніж хрому (III). Іони хрому (III) і нікелю за їх сумісного внесення проявляють більший фітотоксичний ефект на розвиток кореневої системи, ніж надземної частини рослин [12]. Тому вивчення особливостей ростових реакцій у кукурудзи за сумісного впливу Cd²⁺, Cr⁶⁺, Ni²⁺ та Zn²⁺ дозволить наблизитись до розкриття механізмів стійкості рослин.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Підґрунтям для виконання роботи є «Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук НАН України на 2019-2023 роки», а саме: «Молекулярні, клітинні та фізіологічні механізми регуляції процесів у біологічних об'єктах. Принципи формування стійкості живих систем і визначення резервів фотосинтетичної і продукційної здатності рослин» [13]. Робота є продовженням наукових досліджень, що проводились у Криворізькому ботанічному саду НАН України та виконуються в установі зараз: «Фізіологічний сигналінг у трав'янистих рослин за стресової дії важких металів» (0121U100358).

Методологія дослідження. У модельному лабораторному досліді використовували каліброване непротруєне насіння кукурудзи гібридів вітчизняної селекції ДМС Триумф (середньоранній простий модифікований гібрид, ФАО 290), ДМС Оріон (середньостиглий гібрид, ФАО 300), ДМ Петрос (середньоранній простий гібрид, ФАО 260), ДМ Експенсів (середньостиглий простий міжлінійний гібрид, ФАО 320) та ДМС Корал (ранньостиглий простий міжлінійний зерновий гібрид, ФАО 190), надане НВФГ «Компанія «Маїс» (м. Синельникове, Дніпропетровської обл.). В досліді вважали, що ГДК Ni²⁺ – 4; Zn²⁺ – 23; Cd²⁺ – 3 і Cr⁶⁺ – 6 мг/л. Перші три іони вносили у вигляді водних розчинів сульфатів, а хром – K₂Cr₂O₇ у варіантах: контроль (дистильована вода); 1 ГДК Cd²⁺+Ni²⁺+Zn²⁺+Cr⁶⁺; 5 ГДК Cd²⁺+Ni²⁺+Zn²⁺+Cr⁶⁺; 5 ГДК Cd²⁺+Ni²⁺+10 ГДК Zn²⁺+Cr⁶⁺; 5 ГДК Cd²⁺+Cr⁶⁺ +10 ГДК Zn²⁺+Ni²⁺;

10 ГДК $Cd^{2+}+Ni^{2+}+5$ ГДК $Zn^{2+}+Cr^{6+}$; 10 ГДК $Cd^{2+}+Cr^{6+}+5$ ГДК $Zn^{2+}+Ni^{2+}$ і 10 ГДК $Cd^{2+}+Ni^{2+}+Zn^{2+}+Cr^{6+}$. Пророщування насіння, визначення енергії і швидкості проростання, схожості проводили за ДСТУ 4138–2002 [14]. Кореневий індекс (KI) розраховували за D. Wilkins [15]. Повторність у межах окремого варіанту досліду складала 100 рослин, аналітична повторність була 4-кратна. Статистична обробка експериментальних даних проводилась за загальноприйнятими методами параметричної статистики на 95% рівні значимості за О.О. Єгоршиним [16].

Викладення основного матеріалу. Аналіз отриманих даних (табл. 1) свідчить, що вплив мінімальної концентрації важких металів (1 ГДК $Cd^{2+}+Ni^{2+}+Zn^{2+}+Cr^{6+}$) призводить до статистично достовірного підвищення до 5% схожості зернівок у гібридів ДМ Петрос та ДМ Експенсів, тоді як у інших вона не відрізняється від контролю. З цим добре узгоджується і швидкість проростання насіння, яка у більшості гібридів не відрізняється від контрольного варіанту досліду, або збільшується на 8%, як у гібриду ДМ Експенсів. Проте необхідно зауважити, що у останнього спостерігається гальмування початкового етапу проростання зернівок, про що свідчить статистично достовірне зменшення енергії проростання майже на 7%.

Більш висока концентрація іонів важких металів (5 ГДК) у більшості гібридів спричинювала суттєве гальмування проростання насіння. Залучені до експериментів гібриди можна розподілити на дві групи. До першої, у яких схожість зернівок зменшувалась до 21%, належать гібриди ДМС Тріумф, ДМ Експенсів та ДМС Корал, а до другої – гібриди ДМС Оріон і ДМ Петрос у яких іони важких металів у концентрації 5 ГДК не спричинювали статистично достовірного зниження схожості. Зазначене пояснюється зменшенням швидкості та енергії проростання насіння у першій групі гібридів в середньому на 23 і 31% відповідно, тоді як у іншій групі вони або зменшуються лише до 10%, або не відрізняються від значень контролю.

Сумісна дія іонів металів за концентрації 10 ГДК призводила до значно суттєвішого пригнічення процесу проростання насіння кукурудзи, ніж у попередніх варіантах дослідів. Так, у гібридів ДМ Петрос і ДМС Тріумф схожість зернівок зменшувалась на 40 і 44%, тоді як найбільше пригнічення процесів проростання встановлено у гібриду ДМ Експенсів (схожість знижувалась у 3 рази). У насіння останнього була і найменша швидкість його проростання (вона зменшувалась на 70%). Поряд з цим сумісна дія іонів металів в максимальній концентрації лише на 20–25% пригнічувала проростання зернівок гібридів ДМС Оріон і ДМС Корал. Однак, якщо у гібриду Оріон енергія та швидкість проростання знижувалась на 30%, то у гібриду ДМС Корал початкові етапи проростання насіння гальмувались набагато силь-

ніше (енергія проростання зменшувалась більше, ніж на 50%).

Для нас було важливим оцінити як на схожість насіння впливає різна комбінація 2 типів іонів металів у максимальних концентраціях, які відносяться, згідно з попередніми дослідженнями різних науковців та чинних на сьогодні стандартів [17, 18], до високонебезпечних (кадмій і цинк) та помірно небезпечних (хром і нікель). Обговорюючи отримані результати необхідно констатувати, що дія іонів металів у різних комбінаціях по-різному гальмувала схожість зернівок. Дані таблиці 1 дозволяють констатувати, що у варіантах дослідів, коли Cd^{2+} був у максимальній концентрації, відбувалося більше пригнічення процесів проростання насіння кукурудзи, ніж коли Zn^{2+} був у максимальній концентрації. Також для більшості гібридів встановлено однаковий негативний вплив на схожість зернівок, коли Zn^{2+} , разом з Ni^{2+} або Cr^{6+} , були присутні у максимальній концентрації на тлі 5 ГДК Cd^{2+} і Cr^{6+} , або 5 ГДК Cd^{2+} і Ni^{2+} . Лише для гібриду ДМ Експенсів статистично достовірно доведено, що у варіанті 5 ГДК $Cd^{2+}+Ni^{2+}+10$ ГДК $Zn^{2+}+Cr^{6+}$ схожість зернівок була на 22% більшою, ніж у варіанті 5 ГДК $Cd^{2+}+Cr^{6+}+10$ ГДК $Zn^{2+}+Ni^{2+}$.

Для гібридів ДМС Тріумф, ДМ Експенсів та ДМС Корал встановлено більшу статистично достовірну негативну дію на схожість насіння, коли Cd^{2+} і Cr^{6+} знаходяться в максимальній концентрації на тлі 5 ГДК Zn^{2+} і Cr^{6+} , або 5 ГДК Zn^{2+} і Ni^{2+} . У гібридів ДМС Оріон і ДМ Петрос не встановлено значущої різниці між цими варіантами дослідів (схожість була 71 і 69 та 76 і 77 відповідно).

Тобто, загальною закономірністю для гібридів кукурудзи є пригнічення процесу проростання насіння з підвищенням концентрації іонів металів, тоді як іони за мінімальних концентрацій або не впливають на схожість насіння (гібриди ДМС Тріумф, ДМС Оріон, ДМ Петрос і ДМС Корал), або підвищують її (гібриди ДМ Петрос та ДМ Експенсів). Доведена металоспецифічність дії іонів високонебезпечних (кадмію та цинку) металів, яка проявляється в більшому пригніченні схожості зернівок, коли кадмій присутній в максимальній концентрації, порівняно з відповідними варіантами для іонів цинку. Також для гібридів ДМС Тріумф, ДМ Експенсів та ДМС Корал встановлено більшу статистично достовірну негативну дію на схожість насіння, коли Cd^{2+} і Cr^{6+} знаходяться в максимальній концентрації на тлі 5 ГДК Zn^{2+} і Cr^{6+} , або 5 ГДК Zn^{2+} і Ni^{2+} , тоді як для гібридів ДМС Оріон і ДМ Петрос не встановлено значущої різниці між цими варіантами дослідів.

Одними з найбільш загальних та інтегральних показників токсичного впливу надлишкових концентрацій важких металів на рослини є гальмування ростових процесів і зменшення біомаси. Закордонними дослідниками запропонований

Таблиця 1

Показники схожості насіння гібридів кукурудзи, n=100

Варіант досліджу	Енергія проростання		Швидкість проростання		Схожість	
	M±m	% до контролю	M	% до контролю	M±m	% до контролю
ДМС Триумф						
Контроль	88±2	s	14	s	97±1	s
1 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	93±2*	105,7	14	100,0	97±1	100,0
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	71±2*	80,7	12	85,7	82±1*	84,5
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	64±1*	72,7	12	85,7	81±2*	83,5
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	61±1*	69,3	9	64,3	66±1*	68,0
10 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ + Ni ²⁺	44±2*	50,0	8	57,1	55±2*	56,7
5 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Ni ²⁺	74±4*	84,1	12	85,7	83±3*	85,6
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	47±2*	53,4	8	57,1	54±1*	55,7
ДМ Експенсів						
Контроль	85±1	s	13	s	92±2	s
1 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	81±2*	93,3	14	108,0	97±1*	105,4
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	48±1*	56,5	8	61,5	80±1*	87,0
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	45±5*	52,9	11	84,6	59±3*	64,1
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	18±1*	21,2	6	46,2	43±2*	46,7
10 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ + Ni ²⁺	27±2*	31,8	5	38,5	34±1*	37,0
5 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Ni ²⁺	41±1*	48,2	7	53,8	46±2*	50,0
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	24±1*	28,2	4	30,8	31±3*	33,7
ДМС Опіон						
Контроль	91±2	s	13	s	92±2	s
1 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	91±3	100,0	13	100,0	94±2	102,2
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	82±2*	90,1	12	92,3	87±2	90,1
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	87±1	95,6	13	100,0	92±1	100,0
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	64±3*	70,3	10	76,9	71±2*	77,2
10 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ + Ni ²⁺	56±4*	61,5	10	76,9	69±2*	75,0
5 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Ni ²⁺	84±1*	92,3	13	100,0	89±2	96,7
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	63±3*	69,2	10	76,9	73±3*	79,3
ДМ Петрос						
Контроль	90±2	s	14	s	96±1	s
1 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	98±1*	108,9	14	100,0	99±1*	103,1
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	83±1*	92,2	14	100,0	97±1	101,0
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	83±1*	92,2	13	92,9	89±1*	92,7
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	64±1*	71,1	11	78,6	76±2*	79,2
10 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ + Ni ²⁺	66±2*	73,3	11	78,6	77±2*	80,2
5 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Ni ²⁺	86±2	95,6	13	92,9	92±2	95,8
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	47±1*	52,2	8	57,1	59±1*	61,5
ДМС Корал						
Контроль	82±1	s	12	s	85±2	s
1 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	85±1	103,7	12	100,0	86±1	101,2
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	57±3*	69,5	10	83,3	67±3*	78,8
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	50±3*	61,0	10	83,3	67±1*	78,8
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	57±2*	69,5	10	83,3	70±1*	82,4
10 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ + Ni ²⁺	35±3*	42,7	6	50,0	45±2*	52,9
5 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Ni ²⁺	39±2*	47,6	9	75,0	64±4*	75,3
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	33±2*	40,2	9	75,0	64±2*	75,3

Примітка: * – статистично достовірна різниця за t-критерієм Стьюдента розраховувалась по відношенню до контролю, стандартне значення t-критерію Стьюдента = 2,0 при p<0,05.

ряд показників за якими можна визначають зміни накопичення біомаси та росту рослин в умовах стресового впливу різноманітних токсикантів. До показників за якими запропоновано оцінювати фітотоксичність певних елементів на ріст рослин можна віднести індекс толерантності (ІТ) впроваджений M.Lenka [19], ростового інгібування (ІРІ) розроблений L.Leita [20] та кореневий індекс (КІ) запропонований D.Wilkinson [15]. Наведені індекси можуть ефективно використовуватися при визначенні ступеня толерантності рослин до негативного впливу важких металів.

В нашій роботі для оцінки стійкості рослин та фітотоксичності сумісної дії іонів кадмію, цинку, нікелю та хрому (VI) застосовували зміну довжини головного кореня та КІ. Порівнюючи ефекти фітотоксичності металів, залучених до експерименту, необхідно констатувати, що це питання неможливо розглядати без врахування особливостей гібридоспецифічності.

Аналізуючи результати оцінки впливу комплексу іонів металів на показники росту кореня у гібридів кукурудзи, наведені в таблиці 2, необхідно констатувати, що вже за мінімального вмісту іонів металів у середовищі вирощування гібриди розподілились на 2 групи: до першої, для проростків якої характерне зменшення довжини головного кореня, і відповідно значень КІ, належать гібриди ДМ Експенсів, ДМ Петрос і ДМС Корал (для двох останніх зменшувались найсуттєвіше – до 0,77 і 0,76 відповідно). Для гібридів другої групи (ДМС Оріон, ДМС Тріумф) не встановлено статистично достовірного зменшення довжини головного кореня (значення КІ коливались від 0,95 до 1,02).

З підвищенням вмісту іонів у середовищі вирощування до 5 ГДК встановлено різке зниження довжини головного кореня. Найменше гальмування росту кореня було у проростків гібриду ДМ Експенсів (35,7% до контролю), а найбільше (25,3% до контролю) – у ДМС Тріумф.

Таблиця 2

Фітотоксична дія іонів кадмію, цинку, хрому (VI) і нікелю на проростки кукурудзи за сумісного внесення до середовища вирощування, n=100

Варіант дослідю	Довжина головного кореня, мм			КІ
	M±m	V, %	Tst	
1	2	3	4	5
ДМС Тріумф				
Контроль	43,04±1,09	24,9	–	–
1 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	41,00±1,03 ^{x*}	24,7	1,4	0,95
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	10,89±0,30 ^{x*}	24,9	29,0	0,25
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	9,04±0,27 ^x	24,9	30,0	0,21
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	9,02±0,27 ^x	24,4	30,3	0,21
10 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ + Ni ²⁺	8,70±0,29	22,1	30,5	0,20
5 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Ni ²⁺	8,73±0,27	27,4	30,6	0,20
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	8,17±0,27	23,3	31,1	0,19
ДМС Оріон				
Контроль	56,60±1,43	24,5	–	–
1 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	57,45±1,49 ^{x*}	25,2	0,41	1,02
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	18,21±0,51 ^{x*}	25,0	25,3	0,32
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	16,36±0,43 ^{x*}	24,9	26,9	0,29
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	13,98±0,43 ^{x*}	24,7	28,5	0,25
10 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ + Ni ²⁺	12,25±0,41	24,8	29,8	0,22
5 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Ni ²⁺	16,79±0,49 ^{x*}	27,0	26,3	0,30
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	12,71±0,39	24,4	29,6	0,22
ДМ Петрос				
Контроль	59,83±1,52	24,7	–	–
1 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	45,89±1,09 ^{x*}	23,5	7,5	0,77
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	16,88±0,44 [*]	25,0	27,1	0,28
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	17,14±0,44 ^{x*}	23,8	26,9	0,29
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	16,66±0,49 [*]	24,7	27,0	0,28
10 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ + Ni ²⁺	14,72±0,48	26,7	28,2	0,25
5 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Ni ²⁺	17,71±0,47 ^{x*}	25,2	26,4	0,30
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	15,72±0,54	25,7	27,3	0,26

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5
ДМ Експенсів				
Контроль	38,30±1,02	24,9	–	–
1 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	34,82±0,92 ^{x*}	26,1	2,5	0,91
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	13,67±0,43 ^x	24,5	22,3	0,36
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	11,96±0,31	23,5	24,8	0,31
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	12,51±0,45	23,8	23,2	0,33
10 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ + Ni ²⁺	12,41±0,53	24,7	22,6	0,32
5 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Ni ²⁺	13,74±0,53 [*]	25,2	21,5	0,36
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	11,81±0,31 [*]	14,8	24,9	0,31
ДМС Корал				
Контроль	43,68±1,19	24,7	–	–
1 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	33,28±0,89 ^{x*}	24,7	7,0	0,76
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	13,35±0,44 ^{x*}	24,8	23,9	0,31
5 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	13,56±0,49 ^{x*}	25,7	23,4	0,31
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ +Cr ⁶⁺	13,51±0,45 ^{x*}	25,3	23,7	0,31
10 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +5 ГДК Zn ²⁺ + Ni ²⁺	10,0±0,38	24,3	27,0	0,23
5 ГДК Cd ²⁺ + Cr ⁶⁺ +10 ГДК Zn ²⁺ +Ni ²⁺	13,76±0,56 ^{x*}	24,9	22,8	0,32
10 ГДК Cd ²⁺ +Ni ²⁺ +Zn ²⁺ + Cr ⁶⁺	10,54±0,35	26,0	26,8	0,24

Примітка: Tst – фактичне значення t-критерію Стьюдента розраховувалось по відношенню до контролю; x – статистично достовірна різниця за t-критерієм Стьюдента по відношенню до варіанту 10 ГДК Cd²⁺+Ni²⁺+Zn²⁺+Cr⁶⁺; * – статистично достовірна різниця за t-критерієм Стьюдента по відношенню до варіанту 10 ГДК Cd²⁺+Cr⁶⁺+5 ГДК Zn²⁺+Ni²⁺; стандартне значення t-критерію Стьюдента = 2,0 при p<0.05.

Збільшення рівня іонів важких металів у середовищі вирощування до 10 ГДК призводило до статистично значущого зменшення довжини кореня по відношенню до варіанту 5 ГДК у всіх гібридів. Найсуттєвіше гальмування росту кореня по відношенню до контрольних значень було зафіксоване для гібриду ДМС Триумф ДМ (на 81%), тоді як іони металів найменше пригнічували ріст головного кореня у проростків гібриду ДМ Експенсів (на 69,2%).

Виконана статистична обробка отриманих даних дозволила встановити, іншу гібридоспецифічність впливу іонів металів на ріст кореня. Так, у проростків гібридів ДМС Орion, ДМС Корал, ДМ Експенсів і ДМС Триумф значення довжини кореня у варіанті 10ГДК Cd²⁺+ Cr⁶⁺+5ГДК Zn²⁺+ Ni²⁺ статистично достовірно не відрізнялися від варіанту, коли іони металів були у максимальній концентрації, тобто призводили до однакового найбільшого негативного ефекту, на відміну від інших варіантів дослідів, коли іони кадмію і цинку були в максимальній концентрації на тлі менших концентрацій Ni²⁺ і Cr⁶⁺. Металоспецифічність дії іонів у варіанті 10ГДК Cd²⁺+ Cr⁶⁺+5ГДК Zn²⁺+ Ni²⁺ у проростків гібридів ДМ Експенсів і ДМС Триумф проявлялася в тому, що вони виявили однаковий негативний ефект на ріст головного кореня, як і за інших варіантів, коли іони кадмію і цинку були в максимальній концентрації без залежності від концентрації іонів нікелю та хрому.

Головні висновки. Загальною закономірністю для гібридів кукурудзи було пригнічення процесу

проростання насіння з підвищенням концентрації іонів металів, тоді як мінімальні їх концентрації або не впливали на схожість насіння (гібриди ДМС Триумф, ДМС Орion, ДМ Петрос і ДМС Корал), або підвищували її (гібриди ДМ Петрос та ДМ Експенсів). Доведена металоспецифічність дії іонів високонебезпечних (кадмію та цинку) металів, яка проявляється в більшому пригніченні схожості зернівок, коли кадмій присутній у максимальній концентрації, порівняно з відповідними варіантами для іонів цинку.

Для гібридів ДМС Триумф, ДМ Експенсів та ДМС Корал встановлено більшу статистично достовірну негативну дію на схожість насіння, коли Cd²⁺ і Cr⁶⁺ знаходяться в максимальній концентрації на тлі 5ГДК Zn²⁺ і Cr⁶⁺, або 5 ГДК Zn²⁺ і Ni²⁺, тоді як для гібридів ДМС Орion і ДМ Петрос не встановлено статистично достовірної різниці між цими варіантами дослідів.

За мінімального вмісту іонів металів у середовищі вирощування гібриди розподілились на 2 групи: до першої належать гібриди ДМ Експенсів, ДМ Петрос і ДМС Корал для проростків яких характерне зменшення довжини головного кореня, і відповідно значень кореневого індексу. Для гібридів другої групи (ДМС Орion, ДМС Триумф) не встановлено статистично достовірного зменшення довжини головного кореня.

У проростків гібридів ДМС Орion, ДМС Корал, ДМ Експенсів і ДМС Триумф довжина кореня у варіанті 10ГДК Cd²⁺+ Cr⁶⁺+5ГДК Zn²⁺+ Ni²⁺ статистично

достовірно не відрізнялася від варіанту, коли іони металів були у максимальній концентрації, тобто спричинювали найбільший негативний ефект, на

відміну від інших варіантів дослідів, коли іони кадмію і цинку були в максимальній концентрації на тлі менших концентрацій Ni^{2+} і Cr^{6+} .

Література

1. Гришко В.М., Сишиков Д.В., Піскова О.М., Данильчук О.В., Машталер Н.В. Важкі метали: надходження в ґрунти, транслокація у рослинах та екологічна небезпека. Донецьк: Донбас, 2012. 304 с.
2. Кузьменко Є.І., Кузьменко А.С. Оцінка фітотоксичності важких металів в умовах моно- і поліелементного забруднення ґрунту. *Агроекологічний журнал*. 2013. № 1. С. 33–35.
3. Антоняк Г.Л., Мамчур З.І., Першин О.І., Бубис О.Є., Кордош Т.В. Біологічна доступність важких металів та їх акумуляція в тканинах рослин. *Вісник проблем біології і медицини*. 2005. Вип. 3. Т. 2 (123). С. 11–16.
4. Шевчук В.Д., Мудрак Г.В., Франчук М.О. Екологічна оцінка інтенсивності забруднення ґрунтів важкими металами. *Agricultural sciences / «Colloquium-journal»* 2021. 12(99). С. 40–46.
5. Гришко В.М., Лисенко О.І. Ефективність використання препарату «Антистрес» на врожайність різних за стійкістю гібридів кукурудзи на ґрунтах за надлишкового вмісту хрому і нікелю *Екологічні науки*. 2020. № 6(33). С. 103–109. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.6-33.15>.
6. Ranum, P.; Peña-Rosas, J.P.; Garcia-Casal, M.N. Global maize production, utilization, and consumption. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 2014. 1312. P. 105–112. DOI: 10.1111/nyas.12396.
7. Державна служба статистики України. Рослинництво України. Статистичний збірник 2018. Київ, 2019. 220 с. URL: http://www.ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/2019/zb/04/zb_rosl_2018.pdf
8. Basharat Ali, Rafaqat A. Gill. Heavy metal toxicity in plants: Recent insights on physiological and molecular aspects, volume II. *Front Plant Sci. Sec. Plant Nutrition*. 2022. Vol. 13. DOI:10.3389/fpls.2022.1016257.
9. Vasilachi I.C, Stoleru V., Gavrilesco M. Analysis of Heavy Metal Impacts on Cereal Crop Growth and Development in Contaminated Soils. *Agriculture* 2023. 13(10). DOI:10.3390/agriculture13101983.
10. Aydinalp C., Marinova S. The effects of heavy metals on seed germination and plant growth on alfalfa plant (*Medicago sativa*) *Bulgarian Journal of Agricultural Science*. 2009. 15 (№ 4). P. 347–350.
11. Артюшенко Т.А. Участь аскорбінової кислоти і ферментів її метаболізму у фізіологічній адаптації гороху та кукурудзи до сумісної дії сполук нікелю і кадмію: автореф. дис. ... канд біол. наук: 03.00.12. Київ, 2012. 21 с.
12. Гришко В.М., Лисенко О.І. Фітотоксичність хрому і нікелю на початковому етапі онтогенетичного розвитку кукурудзи. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Біологія»*. 2019. Вип. 33, С. 123–132. DOI: 10.26565/2075-5457-2019-33-15.
13. Постанова Президії Національної академії наук України від 30.01.2019 №30. Про Основні наукові напрями та найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних, суспільних і гуманітарних наук Національної академії наук України на 2019–2023 роки URL: <https://www.nas.gov.ua/legaltexts/DocPublic/P-190130-30-0.pdf>.
14. ДСТУ 4138-2002. Насіння сільськогосподарських культур. Методи визначення якості. – [Чинний від 2002-12-28]. Київ, 2003. 170 с.: (Держстандарт України).
15. Wilkins D.A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth. *New Phytol.* 1978. Vol. 80. № 3. P. 623–633.
16. Сторшин О.О., Лісовий М.В. Математичне планування польових дослідів та статистична обробка експериментальних даних. Харків: Вид-во Ін-ту ґрунтознавства та агрохімії ім. О.Н.Соколовського, 2005. 193 с.
17. Kabata-Pendias, A. Trace Elements in Soil and Plants. Boca Raton FL.CRC Press, 2001. 403 p.
18. ГОСТ 17.4.1.02-83 Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения. [Действующий от 1985-01-01]. Москва, 1985. 28 с.
19. Lenka M., Dos B.L., Panda K.K., Panda B.B. Mercury-tolerance of *Chloris barbata* Sw. and *Cyperus rotundus* L. isolated from contamination sites. *Biol. Plant.* 1993. Vol. 35. № 3. P. 443–446.
20. Leita L., Nobili M.D., Mondini C., Garcia M.T.B. Response of Leguminosae to cadmium exposure. *J. Plant Nutr.* 1993. Vol. 16. P. 2001–2012.