

УДК: 581.14:633.15:502.521

## Фітотоксичність хрому і нікелю на початковому етапі онтогенетичного розвитку кукурудзи В.М.Гришко, О.І.Лисенко

Проаналізовано дані про фітотоксичність сумісної дії іонів хрому та нікелю на гібриди кукурудзи Премія 190 МВ і Євро 401 СВ в лабораторних вегетаційних дослідах. Рослини вирощували 6 діб у вегетаційних посудинах за температури 26–27°C на стандартному поживному середовищі Хогланда-Снайдерс, при освітленні 15000 люкс впродовж 16 годин на добу, за аерації поживного середовища. Потім до вегетаційних посудин вносили сполуки хрому і нікелю. Вплив комбінованої дії водних розчинів сульфатів хрому (III) і нікелю (II) вивчали в наступних варіантах досліду: контроль (дистильована вода); 1ГДКNi<sup>2+</sup>+1ГДКCr<sup>3+</sup>; 10ГДКNi<sup>2+</sup>+1ГДКCr<sup>3+</sup>; 1ГДКNi<sup>2+</sup>+10ГДКCr<sup>3+</sup>; 10ГДКNi<sup>2+</sup>+10ГДКCr<sup>3+</sup> (ГДК – гранично допустима концентрація елементу в ґрунті). У дослідах вважали, що ГДК Cr 6 мг/л і ГДК Ni 4 мг/л. Через 24 і 72 годин після внесення розчинів хрому і нікелю вимірювали довжину головного кореня і висоту надземної частини та їх масу, розраховували значення кореневого індексу. Інгібуючий ефект іонів хрому та нікелю на ріст рослин Премія 190 МВ був до 1,4 раза менший, ніж у гібрида Євро 401 СВ. При 72 годинах вирощування рослин за мінімальної концентрації хрому на тлі максимальної нікелю гальмування росту головного кореня рослин гібрида Премія 190 МВ становило 27%, тоді як за максимальної концентрації хрому на тлі мінімального вмісту нікелю – 19,4%. Для гібрида Євро 401 СВ встановлено більший ефект гальмування росту кореня: у варіанті з максимальним вмістом нікелю на тлі мінімального хрому – на 54,6%, а за максимального вмісту хрому – на 40%. Поряд з цим встановлено, що іони хрому і нікелю в мінімальних концентраціях стимулювали ріст головного кореня у гібрида Премія 190 МВ на 16–17 %, тоді як у Євро 401 СВ – пригнічували на 33%. Загалом аналогічна закономірність спостерігалась і при продукуванні маси кореневої системи. Найбільш істотно цей ефект проявлявся у гібрида Євро 401 СВ. Зменшення маси сирової та сухої речовини рослин цього гібрида за максимального вмісту нікелю становило 50 і 28%, тоді як за максимального вмісту хрому – 40 і 20% відповідно. Отримані результати свідчать як про більший негативний ефект іонів хрому на рослини кукурудзи, так і про меншу металотолерантність проростків гібрида Євро 401 СВ в порівнянні з гібридом Премія 190 МВ до сумісної дії хрому і нікелю. Отримані результати дозволяють констатувати, що у рослин кукурудзи на початкових етапах їх онтогенетичного розвитку спостерігається більший до 15% негативний вплив іонів нікелю, ніж хрому, на приріст коренів та надземної частини, утворення сирової та сухої маси. Іони хрому і нікелю за їх сумісного внесення проявляють більший фітотоксичний ефект на розвиток кореневої системи, ніж надземної частини рослин. Встановлене, скоріш за все, пояснюється функціонуванням анатомічних та фізіолого-біохімічних бар'єрних механізмів в системі «корінь–листок» щодо надлишкової транслокації іонів металів, які спричиняють інгібуючі ефекти.

**Ключові слова:** кукурудза; гібриди; хром; нікель; фітотоксичність; ріст; надземна частина; коренева система.

## Phytotoxicity of chromium and nickel in early stage of ontogenetic development of corn V.M.Gryshko, O.I.Lysenko

The data on phytotoxicity of the combined action of chromium and nickel ions on maize hybrids Premiya 190 MV and Euro 401 SV in laboratory vegetation experiments have been analyzed. Plants were grown during 6 days in vegetation vessels at the temperature of 26–27°C on standard Hogland-Snyder's nutrient medium, with the illumination of 15,000 lux for 16 hours per day and the aeration of nutrient medium. Then chromium and nickel compounds were added into the growth vessels. The effect of the combined action of aqueous solutions of chromium (III) and nickel (II) sulfates was studied in the following variants of the experiment: control (distilled water); 1MPC Ni<sup>2+</sup>+1MPC Cr<sup>3+</sup>; 10MPC Ni<sup>2+</sup>+ 1MPC Cr<sup>3+</sup>; 1MPC Ni<sup>2+</sup>+10MPC Cr<sup>3+</sup>; 10MPC Ni<sup>2+</sup>+10MPC Cr<sup>3+</sup> (MPC – maximum permissible concentration). In the experiments, it was assumed that MPC of Cr is 6 mg/l and MPC of Ni is 4 mg/l. Then, after 24 and 72 hours of applying of chromium and nickel solutions, the length of the main root and the height of the aerial part and their weight were measured, and the root index value was calculated. Analysis of the data showed that the inhibitory effect of chromium and nickel ions on the growth of plant of hybrid Premiya 190 MV was 1.4 times less than that for plants of Euro 401 SV hybrid. At 72 hours of plant growth with a minimum concentration of chromium on the background of maximum nickel, the growth inhibition of main root of plants of hybrid Premiya 190 MV was 27%, while at the maximum concentration of chromium on the background of the minimum nickel content – 19.4%. For hybrid Euro 401 SV more effective inhibition of root growth was found: in the variant with the maximum nickel on the background of minimum chromium – by 54.6%, and at the maximum chromium content – by 40%. At the same time, it was

found that chromium and nickel ions in minimal concentrations stimulated the main root growth by 16–17 % in Premiya 190 MV, whereas in Euro 401 SV – suppressed by 33%. In general, the similar effects were observed for the production of weight of root system. Most significantly, this effect was revealed in the Euro 401 SV hybrid. Reducing the weight of wet and dry mass of this hybrid plants at the maximum nickel content was 50 and 28%, whereas at the maximum concentration of chromium it was 40 and 20% respectively. The obtained results indicate both the greater negative effect of chromium ions on maize plants and the lower metal tolerance of Euro 401 SV hybrid seedlings compared to the Premiya 190 MV at joint influence of chromium and nickel. The results allow to state that in maize plants at the early stages of their ontogenetic development, there is a greater up to 15% negative effect of nickel ions than chromium on the root and aerial part growth, formation of wet and dry weight. Combined action of chromium and nickel ions shows a greater phytotoxic effect on the root system development than on the aerial parts of plants. This effect is, most likely, due to the functioning of the anatomical, physiological and biochemical barrier mechanisms in the root-leaf system with respect to the excessive translocation of metal ions that cause inhibiting effects.

**Key words:** *maize; hybrids; chromium; nickel; phytotoxicity; growth; aerial part; root system.*

### **Фитотоксичность хрома и никеля на начальном этапе онтогенетического развития кукурузы** **В.М.Гришко, О.И.Лысенко**

Проанализированы данные о фитотоксичности совместного действия ионов хрома и никеля на гибриды кукурузы Премия 190 МВ и Евро 401 СВ в лабораторных вегетационных опытах. Растения выращивали 6 суток в вегетационных сосудах при температуре 26–27°C на стандартной питательной среде Хогланда-Снайдерс, при освещении 15000 люкс в течение 16 часов в сутки, при аэрации питательной среды. Затем в вегетационные сосуды вносили соединения хрома и никеля. Влияние комбинированного действия водных растворов сульфатов хрома (III) и никеля (II) изучали в следующих вариантах опыта: контроль (дистиллированная вода); 1ПДКNi<sup>2+</sup>+1ПДКCr<sup>3+</sup>; 10ПДКNi<sup>2+</sup>+1ПДКCr<sup>3+</sup>; 1ПДКNi<sup>2+</sup>+10ПДКCr<sup>3+</sup>, 10ПДКNi<sup>2+</sup>+10ПДКCr<sup>3+</sup> (ПДК – предельно допустимая концентрация элемента в почве). В опытах принимали, что ПДК Cr – 6 мг/л и ПДК Ni – 4 мг/л. Через 24 и 72 часов после внесения растворов хрома и никеля измеряли длину главного корня и высоту надземной части, и их вес, рассчитывали значение корневого индекса. Анализ данных показал, что ингибирующий эффект у гибрида Премия 190 МВ был в 1,4 раза меньше, чем у растений гибрида Евро 401 СВ. При выращивании растений в течении 72 часов на минимальной концентрации хрома на фоне максимальной никеля угнетение роста главного корня растений гибрида Премия 190 МВ составляло 27%, тогда как при максимальной концентрации хрома на фоне минимальной никеля – 19,4%. У гибрида Евро 401 СВ наблюдался больший эффект угнетения роста корня: в варианте с максимальным содержанием никеля на фоне минимального хрома – на 54,6%, а при максимальном содержании хрома – на 40%. Наряду с этим показано, что ионы хрома и никеля в минимальной концентрации стимулировали рост корня у гибрида Премия 190 МВ на 16–17 %, тогда как у Евро 401 СВ – угнетали на 33%. Эта закономерность прослеживалась и при продуцировании биомассы корневой системы. Наиболее существенно этот эффект проявлялся у гибрида Евро 401 СВ. Уменьшение массы сырого и сухого вещества у растений этого гибрида при максимальном содержании никеля составляло 50 и 28%, тогда как при максимальном содержании хрома – 40 и 20% соответственно. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют как о большем отрицательном эффекте ионов никеля на растения кукурузы, так и о меньшей металлоторантности проростков гибрида Евро 401 СВ по сравнению с гибридом Премия 190 МВ к совместному действию хрома и никеля. Полученные результаты позволяют констатировать, что у растений кукурузы на начальных этапах их онтогенетического развития наблюдается большее на 15% негативное влияние ионов хрома, чем никеля, на рост корней и надземной части, образование сырой и сухой массы. Ионы хрома и никеля при их совместном внесении оказывают больший токсический эффект на развитие корневой системы, чем надземной части растений. Установленное, скорее всего, объясняется функционированием анатомических и физиолого-биохимических барьерных механизмов в системе «корень–лист» относительно избыточной транслокации ионов металлов, вызывающих ингибирующие эффекты.

**Ключевые слова:** *кукуруза; гибриды; хром; никель; фитотоксичность; рост; надземная часть; корневая система.*

#### **Вступ**

До теперішнього часу встановлено, що надлишковий вміст важких металів у рослин призводить до численних структурно-функціональних змін, зокрема порушення проникності (бар'єрної функції кутикули) листків за рахунок ліпідних компонентів її поверхневого шару (Гришко, Зубровська, 2017), процесів дихання, транспірації, транспорту речовин до листків (Алексеев, 2008;

Кошкин, 2010), розвитку оксидативного стресу та погіршення функціонального стану рослин (Зубровська, Гришко, 2019). Тестування сполук важких металів на проростках кукурудзи шляхом виміру довжини зони бокових коренів та часу їх росту дозволило встановити зменшення токсичності іонів у ряду  $Cu = Tl > Ag > Cd > Hg > Co > Zn > Pb$  (Іванов и др., 2003). Вирощування пшениці, кукурудзи і огірка за хронічної дії впродовж 7 діб  $Zn^{2+}$ ,  $Pb^{2+}$ ,  $Ni^{2+}$  (у концентраціях від 10 мкМ до 1 мМ) призводило до пришвидшення генерації супероксидного аніон-радикалу  $O_2^{\bullet}$  при збільшенні концентрації  $Pb^{2+}$  і  $Ni^{2+}$ , тоді як для  $Zn^{2+}$  такого значного ефекту не було встановлено (Сазанова и др., 2012). Експериментами болгарських науковців доведено, що фотосинтетичний апарат ячменя характеризується більшою толерантністю серед інших культур до надлишку кадмію. Поряд з цим зменшення продуктивності фотосинтезу на тлі незначних порушень ультраструктури хлоропластів обумовлюється зміною функціональної активності фотосистеми I, на противагу змінам активності фотосистеми II, які не є, на думку авторів, причиною зниження швидкості фотосинтезу. Такі негативні фізіологічні ефекти проявляються як у зменшенні кількості пагонів в процесі кушення, так і у формуванні меншого числа продуктивних пагонів, а також кількості насіння в колосі (Vassilev, 2002).

Таким чином, важкі метали при значно більшому, ніж фізіологічно необхідному, їх рівні акумуляції в рослинах можуть суттєво знижувати продуктивність культур в агроценозах. Враховуючи той факт, що зазначені елементи є одними з компонентів промислових викидів, а іони мають високу рухомість, виникає загроза їх надходження у небезпечних концентраціях до трофічних ланцюгів із продукцією рослинництва, яка вирощується поблизу промислових підприємств. Наприклад, овочева продукція, вирощена у фермерських господарствах у межах агроселітебних ландшафтів с. Тетерівки (Житомирська обл.), є забрудненою кадмієм, цинком і плумбумом. Максимальний внесок у загальну експозицію забруднювачів, що надходять у продукти харчування, вносить картопля (73–86 %), друге місце належить петрушці листовій, третє – буряку столовому та моркві столовій (Герасимчук, Валерко, 2017).

Також необхідно враховувати, що підвищення продуктивності рослинництва безпосередньо залежить від інтенсивного використання мінеральних і органічних добрив та вапнування. Застосування таких агротехнічних прийомів впливає на мікроелементний склад ґрунтів і доступність елементів для рослин (Дегодюк та ін., 2017). Нестача мікроелементів у ґрунті, як і надлишок, пригнічує ріст і розвиток рослин, знижує їх стійкість до несприятливих умов навколишнього природного середовища та хвороб. Розрізняють кілька біологічних груп рослин, що характеризуються підвищеною потребою в тих або інших мікроелементах. Так, зернові, насамперед, реагують на купрум, бобові – на молібден і бор, кукурудза – на цинк, соняшник – на бор і купрум, ріпак – на бор і манган (Господаренко, 2003; Фатеев, Захарова, 2003; Халитов, 2006), тобто потребують внесення як мікродобрив, так і звичайних мінеральних добрив, які містять певну кількість важких металів (Клименко, 2009; Макаренко, 2002). З огляду на наявні дані, інтенсивне використання добрив може призводити також до інтенсифікації їх перерозподілу в системі «ґрунт–рослина» та надходженню до продуктів харчування. В останні роки підвищився інтерес до з'ясування ролі для рослин таких мікроелементів, як нікель і хром (Chen et al., 2009; Shaikh et al., 2013). Якщо для нікелю є свідчення того, що у концентраціях до  $5 \times 10^{-5}$  М іони можуть позитивно впливати на проростання насіння деяких видів, то відносно хрому такі ефекти не встановлено (Крылова, 2010; Gang et al., 2013; Soni, Bhuva, 2015).

Початкові етапи формування проростків є найуразливішою частиною ювенільного етапу індивідуального розвитку рослин, коли спостерігається мінімальна стійкість до дії несприятливих факторів. У літературі здебільшого зустрічаються роботи з вивчення впливу окремих іонів важких металів на ріст та перебіг фізіологічних процесів у рослин і їх продуктивність, тоді як різні ефекти їх комбінованої дії вивчені недостатньо (Гришко, Лисенко, 2017; Заблоцька, Опащук, 2015; Кузьменко, Кузьменко, 2013; Chen et al., 2009). Зокрема в наших попередніх досліджах (Гришко, Лисенко, 2017) було вперше виділено дві групи гібридів кукурудзи за стійкістю до поодинокого та сумісного впливу іонів нікелю і хрому. До першої віднесені гібриди Тон 320 ВС, Престиж 365 МВ, Світ 400 МВ, Премія 190 МВ і Бліц 160 МВ, які проявляють високу металотолерантність. Для них характерна тенденція пригнічення проростання насіння до 10% лише високими концентраціями хрому, як за поодинокі дії, так і на тлі високих концентрацій нікелю. До другої належать гібриди Євро 401 СВ, Фонд 404 МВ і Маїс 226 МВ, що мають високу чутливість до іонів нікелю і хрому (енергія проростання і схожість насіння знижується до 63 і 37% відповідно). Тому метою роботи

було порівняти в лабораторних вегетаційних дослідах вплив сумісної дії іонів хрому і нікелю на ростові показники різних за металостійкістю гібридів кукурудзи, останнє було доведено в нашій попередній роботі (Гришко, Лисенко, 2017).

#### Об'єкти та методи досліджень

Об'єктами досліджень були рослини кукурудзи різних груп стиглості, районованих в степовій зоні України (Премія 190 МВ – ранньостиглий і Євро 401 СВ – середньопізній), насіння яких надала НВФ «Компанія Маїс». Перед висаджуванням насіння замочували на 1 годину в проточній воді, далі 10 хвилин витримували в 5% розчині гіпохлориду натрію, а потім промивали ще 15 хвилин у проточній воді. Після цього підготовлене насіння пророщували в термостаті за температури +25°C 4 доби на дистильованій воді до появи корінців 0,5–1,0 см довжиною. Такі проростки 5 діб вирощували у вегетаційних посудинах за температури 26–27°C на стандартному поживному середовищі Хогланда-Снайдерс, при освітленні 15000 люкс впродовж 16 годин на добу, за аерації поживного середовища. На 6-ту добу до вегетаційних посудин вносили сполуки хрому і нікелю. Вплив комбінованої дії водних розчинів сульфатів хрому (III) і нікелю (II) вивчали в наступних варіантах досліду: контроль (дистильована вода); 1ГДКNi<sup>2+</sup>+1ГДКCr<sup>3+</sup>; 10ГДКNi<sup>2+</sup>+1ГДКCr<sup>3+</sup>; 1ГДКNi<sup>2+</sup>+10ГДКCr<sup>3+</sup>; 10ГДКNi<sup>2+</sup>+10ГДКCr<sup>3+</sup> (ГДК – гранично допустима концентрація елементу в ґрунті). У дослідах вважали, що ГДК Cr 6 мг/л і ГДК Ni 4 мг/л (СанПин 42-128-4433-87; Грицан і др., 1998). Через 24 і 72 годин після внесення розчинів хрому і нікелю проводили відповідні вимірювання довжини головного кореня і надземної частини рослини лінійкою. Значення кореневого індексу (KI) розраховували за Вількінс (Wilkins, 1978). Масу сирої речовини кореня та надземної частини рослин визначали на ВЛКТ-500. Після висушування в сушильній шафі СНОЛ 3,5 І2 за температури 105°C на вагах ВЛР-200 визначали масу сухої речовини (ГОСТ 27548-97). Повторність досліду була 3-кратною, для аналізів використовували 50 рослин. Статистичний аналіз даних проводили методами параметричної статистики (Єгоршин, Лісовий, 2005).

#### Результати та їх обговорення

Отримані дані динаміки росту гібридів кукурудзи свідчать про наявність загальної закономірності у зменшенні довжини головного кореня проростків гібрида Євро 401 СВ, тоді як у гібрида Премія 190 МВ в певних варіантах лабораторного вегетаційного досліду спостерігалась різноспрямована зміна цього показника (табл. 1). Так, у гібрида Євро 401 СВ вже сумісне внесення у середовище вирощування навіть мінімальних концентрацій іонів хрому та нікелю в перші 24 години призводило до зменшення довжини головного кореня. Зазначена тенденція набувала закономірності при збільшенні тривалості вирощування проростків до 72 годин. У цьому варіанті різниця довжини головного кореня від контролю становила більше 33% і була статистично достовірною (табл. 1). Тоді як у гібрида Премія 190 МВ мінімальні концентрації елементів сприяли росту головного кореня, як на 24, так і на 72 годину експерименту (довжина збільшувалась на 16–17%). Причому за менш тривалої сумісної дії навіть коли іони хрому були в максимальній концентрації (впродовж 24 годин), у рослин цього гібрида не спостерігалось статистично достовірної затримки росту головного кореня. Проте, для гібрида Євро 401 СВ встановлено зменшення довжини головного кореня проростків вже за внесення до поживного середовища Хогланда-Снайдерс хоча б одного з іонів металів у максимальній концентрації навіть за нетривалої експозиції.

Причому іони нікелю у максимальній концентрації спричинювали більший негативний ефект на ріст головного кореня, ніж іони хрому. Зокрема при внесенні хрому у мінімальній концентрації на тлі максимального вмісту нікелю у середовищі вже за 24 години вирощування довжина головного кореня у обох гібридів зменшувалась (у гібрида Премія 190 МВ на 14%, а Євро 401 СВ – на 22,8%). Аналогічний ефект встановлено і при збільшенні тривалості дії важких металів. Так, при 72 годинах вирощування рослин за мінімальної концентрації хрому на тлі максимальної нікелю гальмування росту кореня становило у першого гібрида 27%, тоді як за максимальної концентрації хрому на тлі мінімального вмісту нікелю – 19,4%, а темпи гальмування зростали в 1,4 раза. Для гібрида Євро 401 СВ встановлено більший ефект пригнічення росту головного кореня: у варіанті з максимальним вмістом нікелю на тлі мінімального хрому – на 54,6%, а за максимального вмісту хрому – на 40%, і різниця між цими варіантами була статистично достовірною. Проте необхідно відзначити, що темпи гальмування процесів росту кореня як на першу, так і на третю добу впливу



іонів важких металів збільшились в 3,3 раза і становили 4,3 і 14,5% відповідно. Тобто зі збільшенням тривалості дії максимальної концентрації іону одного з металів на тлі мінімальної іншого не встановлено зростання інтенсивності ефекту гальмування приросту головного кореня проростків кукурудзи гібрида Євро 401 СВ.

Таблиця 1.

Довжина головного кореня гібридів кукурудзи, мм,  $n=50$

Варіант досліду	24 години післядії				72 години післядії			
	$M \pm m$	% до контролю	$T_{st}$	KI	$M \pm m$	% до контролю	$T_{st}$	KI
Премія 190 МВ								
Контроль	221,1±8,4	—	—	—	264,6±12,3	—	—	—
1ГДКNi <sup>2+</sup> +1ГДКСr <sup>3+</sup>	259,0±9,6	117,2	3,0	1,2	306,3±11,8	115,6	2,4	1,2
10ГДКNi <sup>2+</sup> +1ГДКСr <sup>3+</sup>	190,4±9,8	86,1	2,4	0,9	193,3±5,9	73,0	5,2	0,7
1ГДКNi <sup>2+</sup> +10ГДКСr <sup>3+</sup>	203,2±8,0	91,9	1,5	0,9	213,4±7,8	80,6	3,5	0,8
10ГДКNi <sup>2+</sup> +10ГДКСr <sup>3+</sup>	139,3±4,0	63,0	8,8	0,6	169,9±3,6	64,2	7,4	0,6
Євро 401 СВ								
Контроль	206,0±7,1	—	—	—	320,9±5,5	—	—	—
1ГДКNi <sup>2+</sup> +1ГДКСr <sup>3+</sup>	198,6±7,6	96,4	0,7	1,0	213,3±7,8	66,7	11,3	0,7
10ГДКNi <sup>2+</sup> +1ГДКСr <sup>3+</sup>	159,5±5,7	77,2	5,1	0,8	145,8±4,6	45,4	24,4	0,5
1ГДКNi <sup>2+</sup> +10ГДКСr <sup>3+</sup>	168,9±7,8	81,5	3,6	0,8	192,2±4,2	59,9	18,6	0,6
10ГДКNi <sup>2+</sup> +10ГДКСr <sup>3+</sup>	133,4±4,2	64,8	8,8	0,6	130,9±3,4	40,8	29,4	0,4

Примітка:  $T_{st}$  – фактичне значення  $t$ -критерію Стьюдента; стандартне значення  $t$ -критерію Стьюдента = 2,0 при  $p < 0,05$ .

Узагальнення результатів різноспрямованої сумісної дії іонів хрому і нікелю на ріст головного кореня у досліджених гібридів, яка проявлялась у статистично достовірному зменшенні довжини головного кореня проростків гібрида Євро 401 СВ, в порівнянні з гібридом Премія 190 МВ, а також відсутність негативного впливу на ріст головного кореня у рослин останнього гібрида при вирощуванні впродовж доби на поживному середовищі Хогланда-Снайдерс у варіанті коли іони хрому були у максимальній концентрації на тлі мінімальної кількості іонів нікелю, свідчить про більшу стійкість рослин гібрида Премія 190 МВ. Зазначене може пояснюватись отриманими нами раніше результатами про меншу металотолерантність проростків Євро 401 СВ до дії хрому та нікелю під час проростання кукурудзи (Гришко, Лисенко, 2017). Проте, з подовженням дії іонів хрому та нікелю до 3 діб в цьому варіанті досліду відмічене статистично достовірне пригнічення росту головного кореня проростків у гібрида Премія 190 МВ на 19%. Однак необхідно констатувати, що воно було на 28% меншим, ніж для менш стійкого гібрида Євро 401 СВ.

Аналіз результатів вегетаційного лабораторного експерименту свідчить, що на тлі максимальних концентрацій іонів хрому спостерігалось статистично достовірне гальмування росту головного кореня проростків у гібрида Премія 190 МВ, причому зі збільшенням тривалості дії до 72 годин пригнічення росту головного кореня спостерігалось і у варіанті з максимальною концентрацією нікелю на тлі мінімального вмісту хрому (табл. 1). Разом із цим, необхідно констатувати, що у гібрида Премія 190 МВ під впливом сумісного внесення іонів нікелю та хрому у максимальній концентрації, на відміну від гібрида Євро 401 СВ, не спостерігалось зростання ефекту пригнічення росту головного кореня із подовженням тривалості дії токсикантів до 72 годин. Так, якщо у проростків гібрида Євро 401СВ довжина головного кореня у зазначеному вище варіанті досліду за першу добу зменшувалась до 65%, а впродовж 72 годин до 41% до контролю, то у проростків гібрида Премія 190 МВ воно коливалось в межах 63–64 %.

Розрахунок значень KI показує, що за сумісного впливу іонів хрому і нікелю у концентрації 1 ГДК на 24 годину дії у гібрида Премія 190 МВ простежується стимуляція росту головного кореня, тоді як у Євро 401 СВ така тенденція не простежується (KI становить 1,2 та 1,0 відповідно). У варіантах досліду, коли хоча б один з елементів був у максимальній концентрації на тлі мінімальної іншого (10ГДКNi<sup>2+</sup>+1ГДКСr<sup>3+</sup> і 1ГДКNi<sup>2+</sup>+10ГДКСr<sup>3+</sup>), значення KI для першого зменшувались до 0,7, а

другого – до 0,5. Також необхідно констатувати, що для гібрида Євро 401 СВ він був меншим на 11%, що також свідчить про більшу фітотоксичність сумісної дії іонів досліджених елементів на цей гібрид. Проте необхідно зазначити, що за дії іонів хрому і нікелю в максимальній концентрації впродовж 24 годин КІ був однаковим для обох гібридів. З подовженням до 72 годин впливу іонів металів у мінімальній концентрації у рослин Премія 190 МВ також спостерігається активація стимулювання ростових процесів, тоді як у Євро 401 СВ ріст головного кореня гальмується на 30%. З підвищенням вмісту іонів важких металів у поживному середовищі для гібрида Євро 401 СВ встановлено суттєвіше пригнічення росту головного кореня, в порівнянні з рослинами Премія 190 МВ (КІ становить 0,4 і 0,6 відповідно). Загальною тенденцією для обох гібридів кукурудзи є більша токсична дія сполук нікелю у порівнянні з хромом. Встановлене пояснюється особливостями транслокації хрому до різних органів рослин, у порівнянні з нікелем. Так, дослідями на *Sinapis alba* L. встановлено, що хоча хрому і акумулювалось більше в коренях, нікель розподілявся більш рівномірно по органах проростку, проте абсолютні значення вмісту нікелю в коренях були в 1,7 раза більшими, у порівнянні з хромом (Fargasova, 2009).

Порівнюючи дію іонів нікелю та хрому в усіх варіантах лабораторних дослідів, необхідно констатувати, що для всіх досліджених гібридів була характерна закономірність меншого негативного впливу надлишку іонів хрому та нікелю на ріст надземної частини проростків в порівнянні із кореневою (табл. 2). Так, якщо за сумісної дії іонів металів у максимальній концентрації впродовж 24 і 72 годин довжина головного кореня у проростків гібрида кукурудзи Євро 401 СВ становила 65 і 45% до контролю, то довжина надземної частини – 77 і 61% відповідно. У гібрида Премія 190 МВ за 24 години вирощування при максимальній концентрації іонів різниця між пригніченням довжини головного кореня та надземної частини становила 20%. Про аналогічні ефекти важких металів свідчать і дослідження фітотоксичності інших металів. Так, у вегетаційних експериментах на гороху, сої та кукурудзи за поодинокі дії надлишкових концентрацій хлоридів, сульфатів та нітратів нікелю і кадмію встановлено суттєвіше пригнічення росту кореневої системи проростків у порівнянні з надземною (Гришко, Сищиков, 2012). Зазначене автор пояснює більшими темпами акумуляції важких металів коренями, ніж листками проростків. У дослідях з ріпаком і соняшником, виконаних львівськими науковцями, відмічається значно вища акумуляція цинку в тканинах кореневої системи порівняно з листками, що, на їх думку, обумовлюється функціонуванням захисних бар'єрних механізмів у системі корінь–листок, які гальмують надходження токсикантів до надземних частин рослин (Гащицин, Пацула, 2014).

Таблиця 2.

Висота надземної частини гібридів кукурудзи, мм,  $n=50$ 

Варіант досліду	24 години післядії			72 години післядії		
	$M \pm m$	% до контролю	$T_{st}$	$M \pm m$	% до контролю	$T_{st}$
Премія 190 МВ						
Контроль	195,8±7,0	—	—	287,3±8,1	—	—
1ГДКNi <sup>2+</sup> +1ГДКCr <sup>3+</sup>	192,7±5,8	98,4	0,3	243,1±12,6	84,6	3,0
10ГДКNi <sup>2+</sup> +1ГДКCr <sup>3+</sup>	180,1±6,6	92,0	1,6	205,2±6,7	71,4	7,8
1ГДКNi <sup>2+</sup> +10ГДКCr <sup>3+</sup>	179,7±6,7	91,8	1,6	219,6±9,7	76,4	5,3
10ГДКNi <sup>2+</sup> +10ГДКCr <sup>3+</sup>	163,0±7,6	83,2	3,2	198,8±6,0	69,2	8,8
Євро 401 СВ						
Контроль	165,7±5,5	—	—	236,2±7,6	—	—
1ГДКNi <sup>2+</sup> +1ГДКCr <sup>3+</sup>	162,1±6,5	97,8	0,4	231,2±6,9	97,9	0,5
10ГДКNi <sup>2+</sup> +1ГДКCr <sup>3+</sup>	150,7±6,0	90,9	1,8	159,9±5,0	67,7	8,4
1ГДКNi <sup>2+</sup> +10ГДКCr <sup>3+</sup>	163,0±7,6	99,6	0,3	162,9±6,4	69,0	7,4
10ГДКNi <sup>2+</sup> +10ГДКCr <sup>3+</sup>	126,8±4,8	76,5	5,3	144,3±4,9	61,1	10,2

Примітка:  $T_{st}$  – фактичне значення  $t$ -критерію Стьюдента; стандартне значення  $t$ -критерію Стьюдента = 2,0 при  $p < 0,05$ .

Порівняння інтенсивності негативного впливу хрому і нікелю на висоту надземної частини проростків двох гібридів кукурудзи свідчить, що у більшості випадків спостерігається тенденція до суттєвішого гальмування росту у гібрида Євро 401 СВ, у порівнянні з гібридом Премія 190 МВ. Наприклад, за сумісної дії іонів у максимальній концентрації впродовж 24 годин висота проростків першого гібрида становила 77% до контролю, тоді як у гібрида Премія 190 МВ – 83%. З продовженням дії до 72 годин гальмування становило 39 і 31% відповідно. Таким чином, отримані результати також можна розглядати як підтвердження більшої металотолерантності проростків гібрида Премія 190 МВ, у порівнянні з Євро 401 СВ. При обговоренні отриманих результатів слід зауважити, що такі ефекти можуть обумовлюватись різною акумуляційною здатністю гібридів. Так, вивчення накопичення купруму і плюмбуму шістьма гібридами і сортами капусти білокачанної довело меншу здатність акумулювати метали саме ранньостиглими сортами і гібридами (Надежкіна и др., 2016). Іншим поясненням цього факту можуть бути відмінності у функціонуванні антиоксидантних систем захисту. Наприклад, Г.Россихіною встановлено, що під впливом стресових факторів (посуха, гербіциди та їх комбінації) у ранньостиглого гібрида кукурудзи Білозірський 295 СВ утворюється менша кількість радикалів супероксид-аніону, які активно знешкоджуються ферментативними системами супероксиддисмутази та каталази, на відміну від середньостиглого гібрида Дніпровський 310 МВ (Россихіна, 2010).

Результати визначення ваги сирої та сухої речовини кореневої системи проростків кукурудзи на 72 годину сумісної дії іонів хрому і нікелю показують, що за мінімальної концентрації обох іонів маса сирої речовини у гібрида Премія 190 МВ статистично достовірно не відрізняється від контролю або навіть зростає на 14%, тоді як у гібрида Євро 401 СВ біомаса зменшується майже на 12–20 % (рис. 1).

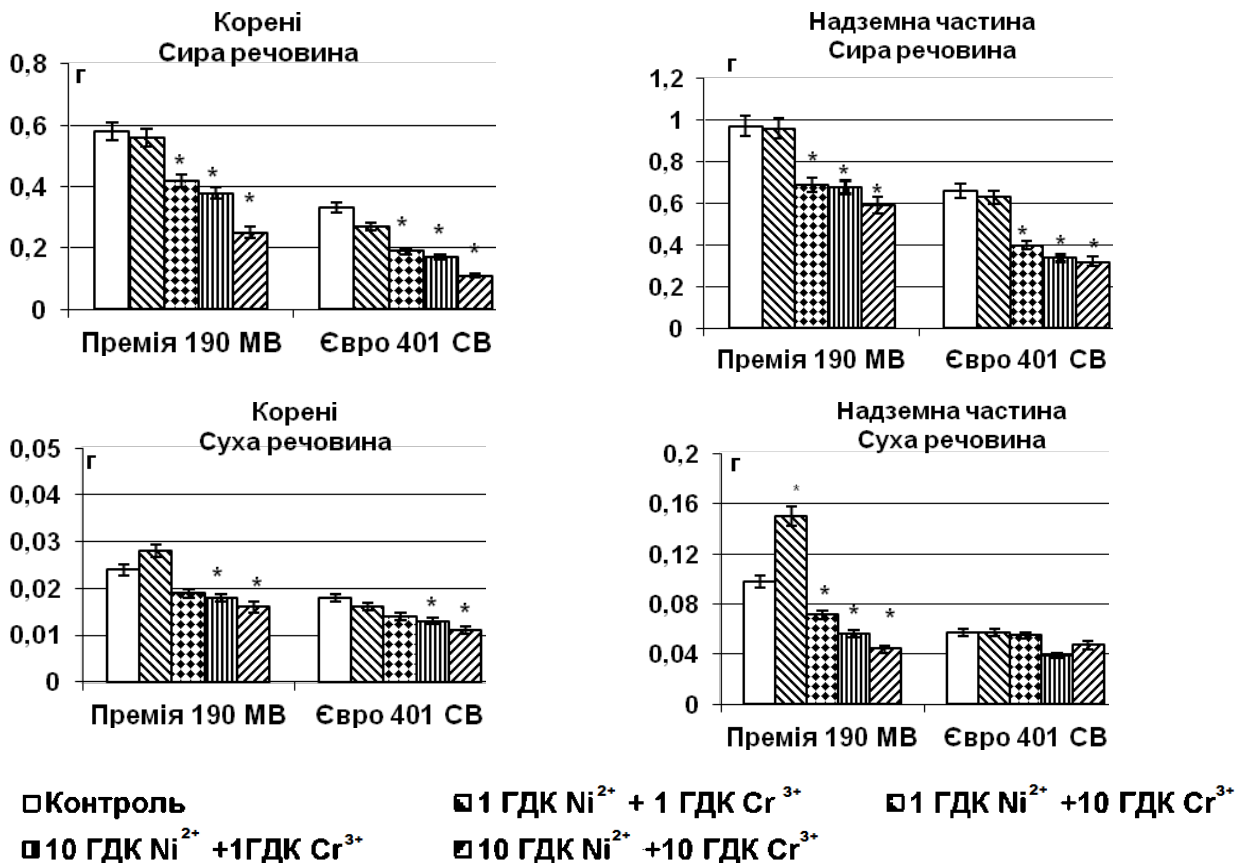


Рис. 1. Маса сирої і сухої речовини коренів і надземної частини гібридів кукурудзи Премія 190 МВ і Євро 401 СВ, г, n=50

Аналізуючи наведені результати, можна констатувати, що нікель у максимальній концентрації на тлі мінімальної іонів хрому проявляв суттєвіший інгібуючий ефект на біосинтез маси кореневої системи, ніж навпаки. Найбільш яскраво цей ефект проявлявся у гібрида Євро 401 СВ. Так, для його проростків було характерним зменшення маси сирі та сухої речовини за максимального вмісту нікелю в поживному середовищі Хогланда-Снайдерс на 50 і 28%, тоді як за максимального вмісту хрому – на 40 і 20% (рис. 1).

Співставлення рівня вищенаведених інгібуючих ефектів для досліджених гібридів показало, що у проростків гібрида Премія 190 МВ він був у 1,3 раза менший, ніж у рослин гібрида Євро 401 СВ. Загалом аналогічна закономірність спостерігалась і для маси сухої речовини рослин. Причому у гібрида Премія 190 МВ статистично достовірний негативний вплив на біосинтез сухої речовини був на 15% більший за дії іонів обох металів у максимальній концентрації, у порівнянні з Євро 401 СВ. Також необхідно констатувати, що пригнічення накопичення маси сирі речовини для обох вивчених гібридів, коли один з елементів був у максимальній концентрації, був суттєвіший, ніж сухої речовини. Тобто отримані результати свідчать як про більший негативний ефект іонів хрому на рослини кукурудзи, так і про меншу металотолерантність до сумісної дії хрому і нікелю проростків гібрида Євро 401 СВ в порівнянні з гібридом Премія 190 МВ, а значний надлишок нікелю у поживному середовищі, у порівнянні з хромом, проявляв більший негативний ефект практично на всі ростові показники гібридів.

### Висновки

Підсумовуючи вищенаведені результати, можна констатувати, що у рослин 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. Іони хрому і нікелю за їх сумісного внесення проявляють більший фітотоксичний ефект на розвиток кореневої системи, ніж надземної частини рослин. Встановлене, скоріш за все, пояснюється функціонуванням анатомічних та фізіолого-біохімічних бар'єрних механізмів в системі «корінь–листок» щодо надлишкової транслокації іонів металів, які спричинюють інгібуючі ефекти. Порівняння металостійкості гібридів до іонів хрому і нікелю свідчить, що гібрид Премія 190 МВ є більш стійким, ніж Євро 401 СВ.

### Список літератури / References

- Алексеев Ю.В. Тяжелые металлы в почвах и растениях. – М.: ПИЯФ РАН, 2008. – 216с. /Alekseyev Yu.V. Heavy metals in soils and plants. – M.: PNPI RAS, 2008. – 216p./
- Гащишин В.Р., Пацула О.І. Накопичення важких металів у рослинах *Brassica napus* L. та *Helianthus annuus* L. під впливом солей цинку та регулятора росту // Физиология растений и генетика. – 2014. – Т.46, №4. – С. 343–350. /Gashchishin V.R., Patsula O.I. Accumulation of heavy metals in *Brassica napus* L. and *Helianthus annuus* L. plants under the influence of zinc salts and growth regulator // Plant Physiology and Genetics. – 2014. – Vol.46, no. 4. – P. 343–350./
- Герасимчук Л.О., Валерко Р.А. Екологічна оцінка якості овочевої продукції агроселітебних територій приміської зони м. Житомира // Агроекологічний журнал. – 2017. – №3. – С. 76–82. /Gerasymchuk L.O., Valerko R.A. Ecological assessment of quality of vegetable production of agro-settlement territories of the suburban area of Zhitomir // Agroecological Journal. – 2017. – No.3. – P. 76–82./
- Господаренко Г.М. Агрохімія мінеральних добрив – К.: Науковий світ, 2003. – 136с. /Gospodarenko G.M. Agrochemistry of mineral fertilizers. – Kyiv: Naukovy svit, 2003. – 136 p./
- Грицан Н.П., Шпак Н.В., Шматков Г.Г. и др. Экологические основы природопользования. – Днепропетровск: ИППЭ НАН Украины, 1998. – 409с. /Gritsan N.P., Shpak N.V., Shmatkov G.G. et al. Ecological basis of ecosystem exploitation. – Dnepropetrovsk: Institute for Nature Management Problems and Ecology of the National academy of Sciences of Ukraine, 1998. – 409p./
- Гришко В.М., Зубровська О.М. Вплив важких металів на процеси пероксидного окиснення та склад ліпідних компонентів поверхневого шару кутикули листків деревних рослин // Физиология растений и генетика. – 2017. – Т.49, №5. – С. 444–451. /Grishko V.M. Zubrovs'ka O.M. Influence of heavy metals on peroxidation processes and composition of cuticle surface layer lipid components of trees leaves // Plant Physiology and Genetics. – 2017. – Vol.49, no.5. – P. 444–451./
- Гришко В.М., Лисенко О.І. Стійкість гібридів кукурудзи до стресового впливу хрому і нікелю на початку ювенільного етапу розвитку рослин // Агроекологічний журнал. – 2017. – №3. – С. 82–88. /Grishko V.M. Lysenko O.I. Stability of corn hybrids to stress effects of chromium and nickel at the beginning of juvenile stage of plant development // Agroecological Journal. – 2017. – No.3. – P. 82–88./



- Гришко В.М., Сищиков Д.В. Функционирование глутатионзависимой антиоксидантной системы и устойчивость растений при действии тяжёлых металлов и фтора. – К.: Наукова думка, 2012. – 239с. /Grishko V.M., Sishchikov D.V. The functioning of the glutathione-dependent antioxidant system and the resistance of plants to heavy metals and fluorine. – Kyiv: Naukova Dumka, 2012. – 239p./
- ГОСТ 27548–97. Корма растительные. Методы определения содержания влаги. – Минск: Изд-во стандартов, 2005. – 7с. /GOST 27548–97. Vegetable feed. Methods for determining the moisture content. - Minsk: Publishing House of Standards, 2005. – 7p./
- Дегодюк С.Е., Літвінова О.А., Дмитренко О.В., Молдаван Л.П. Вплив добрив на накопичення мікроелементів і важких металів у сірому лісовому ґрунті // Агроекологічний журнал. – 2017. – №3. – С. 61–65. /Degodiuk S.Ye., Litvinova O.A., Dmitrenko O.V., Moldavan L.P. Influence of fertilizers on the accumulation of trace elements and heavy metals in gray forest soil // Agroecological Journal. – 2017. – No.3. – P. 61–65./
- Єгоршин 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. – 193с. /Yegorshin O.O., Lisovy M.V. Mathematical planning of field experiments and statistical processing of experimental data. – Kharkov: Publishing House of the Institute for Soil Science and Agrochemistry Research n.a. O.N.Sokolovsky, 2005. – 193p./
- Заблоцька О.С., Опащук Н.М. Реакція проростків пшениці озимої на дію мікроелементів (Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>) в умовах водної культури // Агроекологічний журнал. – 2015. – №4. – С. 90–96. /Zablotskaya O.S., Opashchuk N.M. The response of winter wheat seedlings to the action of trace elements (Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Ni<sup>2+</sup>) under water culture // Agroecological Journal. – 2015. – No.4. – P. 90–96./
- Зубровська О.М., Гришко В.М. Інтенсивність процесів пероксидного окиснення ліпідів та функціональний стан деревних насаджень при забрудненні довкілля важкими металами // Український ботанічний журнал. – 2019. – №5. – С. 458–468. /Zubrovskaya O.M., Grishko V.M. Intensity of lipid peroxidation processes and state of tree plantations under heavy metal pollution // Ukrainian Botanical Journal. – 2019. – No.5. – P. 458–468./
- Иванов В.Б., Быстрова Е.И., Серегин И.В. Сравнение влияния тяжелых металлов на рост корня в связи с проблемой специфичности и избирательности их действия. // Физиология растений. – 2003. – Т.50, №3. – С. 445–454. /Ivanov V.B., Bystrova Ye.I., Seregin I.V. Comparison of the influence of heavy metals on root growth in connection with the problem of the specificity and selectivity of their action // Plant Physiology. – 2003. – Vol.50, no.3. – P. 445–454./
- Клименко І.І. Вплив добрив на накопичення важких металів у темно-сірому опідзоленому ґрунті // Вісник аграрної науки. – 2009. – №6. – С. 67–69. /Klimenko I.I. Influence of fertilizers on the accumulation of heavy metals in dark gray podzolized soil // Bulletin of Agrarian Science. – 2009. – No.6. – P. 67–69./
- Кошкин Е.И. Физиология устойчивости сельскохозяйственных культур. – М.: Дрофа, 2010. – 638с. /Koshkin Ye.I. Physiology of crop sustainability. – Moscow: Drofa, 2010. – 638p./
- Крылова Е.Г. Влияние сульфата никеля на прорастание семян в развитие проростков прибережноводных растений // Журнал Сибирского федерального университета. Серия Биология. – 2010. – Т.3, №1. – С. 99–106. /Krylova Ye.G. The effect of nickel sulfate on seed germination in the development of seedlings of near-water plants // Journal of the Siberian Federal University. Seriya Biology. – 2010. – Vol.3, no.1. – P. 99–106./
- Кузьменко Є.І., Кузьменко А.С. Оцінка фітотоксичності важких металів в умовах моно- і поліелементного забруднення ґрунту // Агроекологічний журнал. – 2013. – №1. – С. 33–35. /Kuzmenko Ye.I., Kuzmenko A.S. Assessment of phytotoxicity of heavy metals under conditions of mono- and polyelement soil contamination // Agroecological Journal. – 2013. – No.1. – P. 33–35./
- Макаренко Н.А. Агроекологічна оцінка мінеральних добрив за впливом на ґрунтову систему. Автореф. дис. ... д-ра с.-г. наук / 03.00.16. – К., 2002. – 16с. /Makarenko N.A. Agroecological estimation of mineral fertilizers after influence system. Abstract of Dr. Sciences (Biology) thesis / 03.00.16. – Kyiv, 2002. – 16p./
- Надежкіна Е.В., Соловьев А.В., Молодова О.В., Ларина М.О. Биоаккумуляция элементов в различных сортах и гибридах капусты // Овощеводство и тепличное хозяйство. – 2016 – №5. – С. 53–58. /Nadezhkina Ye.V., Soloviev A.V., Molodova O.V., Larina M.O. Bioaccumulation of elements in various varieties and hybrids of cabbage // Vegetable Growing and Greenhouse Farming. – 2016. – No.5. – P. 53–58./
- СанПин 42-128-4433-87. Санитарные нормы допустимых концентраций химических веществ в почве. – М.: Б.и., 1988. – 32с. /SanPin 42-128-4433-87. Sanitary standards for permissible concentrations of chemicals in the soil. – Moscow, 1988. – 32p./
- Россихіна Г. Стан антиоксидантної ферментативної системи рослин кукурудзи за дії ґрунтових гербіцидів і посухи // Вісник Львівського ун-ту. Серія біологічна. – 2010. – Вип.53. – С. 188–198. /Rossikhina G. State of antioxidant enzymatic system of maize plants under the action of soil herbicides and drought // Visnyk of Lviv University. Biology Series. – 2010. – Vol.53. – P. 188–198./
- Сазанова К.А., Башмаков Д.И., Лукатин А.С. Генерация супероксидного анион-радикала в листьях растений при хроническом действии тяжелых металлов // Труды Карельского научного центра РАН. – 2012. – №2. – С. 119–124. /Sazanova K.A., Bashmakov D.I., Lukatin A.S. The generation of superoxide anion,

radical in plant leaves under the chronic action of heavy metals // Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. – 2012. – No.2. – P. 119–124./

Фатеев А.Н., Захарова М.А. Основы применения микроудобрений. – Х., 2003. – 110с. /Fateyev A.N., Zakharova M.A. Fundamentals of the use of micronutrient fertilizers. – Kharkov, 2003. – 110p./

Халитов Н.Г. Содержание макроэлементов и тяжелых металлов в полевых культурах // Земледелие. – 2006. – №2. – С.28. /Khalitov N.G. The content of macronutrients and heavy metals in field crops // Agriculture. – 2006. – No.2. – P.28./

Chen C., Huang, Liu J. Functions and toxicity of nickel in plants: recent advances and future prospects // Journal of Clean Soil, Air, Water. – 2009. – Vol.37 (4–5). – P. 304–313.

Fargasova A. Phytotoxicity of chromium and nickel // Ecological Chemistry and Engineering S. – 2009. – Vol.15, no.3. – P. 335–347.

Gang A., Vyas H., Vyas A. A study of heavy metal toxicity on germination and seedling growth of soybean // Sciences Secure Journal of Biotechnology. – 2013. – No.2. – P. 5–9.

Shaikh I.R., Shaikh P.R., Shaikh R.A., Shaikh A.A. Phytotoxic effect of heavy metals (Cr, Cd, Mn and Zn) on wheat (*Triticum aestivum* L.) seed germination and seedling growth in black cotton soil of Nanded, India // Research Journal of Chemical Sciences. – 2013. – Vol.3 (6). – P. 14–23.

Soni K.V., Bhuvra B.D. Effect of chromium and manganese metal on biomass and growth rate of some pulses // International Journal of Pharma and Biosciences. – 2015. – Vol.6, no.2 (B). – P. 67–78.

Vassilev A. Physiological and agroecological aspects of cadmium interactions with barley plants: an overview // J. Central Eur. Agric. – 2002. – Vol.4, no.1. – P. 65–74.

Wilkins D.A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth // New Phytol. – 1978. – Vol.80, no.3. – P. 623–633.

---

**Представлено: Ю.В.Карпець / Presented by: Yu.V.Karpets**

**Рецензент: О.О.Авксентьєва / Reviewer: O.O.Avksentieva**

*Подано до редакції / Received: 12.02.2019*

**Про авторів:** В.М.Гришко – Криворізький ботанічний сад НАН України, вул. Маршака, 50, м. Кривий Ріг, Україна, 50089, vitgryshko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1680-5175>

О.І.Лисенко – Криворізький ботанічний сад НАН України, вул. Маршака, 50, м. Кривий Ріг, Україна, 50089, olyalis080991@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9746-7488>

**About the authors:** V.M.Gryshko – Kryvyi Rih Botanical Garden NAS of Ukraine, Marshak Str., 50, Kryvyi Rih, Ukraine, 50089, vitgryshko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1680-5175>

O.I.Lysenko – Kryvyi Rih Botanical Garden NAS of Ukraine, Marshak Str., 50, Kryvyi Rih, Ukraine, 50089, olyalis080991@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9746-7488>

**Об авторах:** В.Н.Гришко – Криворожский ботанический сад НАН Украины, ул. Маршака, 50, г. Кривой Рог, Украина, 50089, vitgryshko@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1680-5175>

О.И.Лысенко – Криворожский ботанический сад НАН Украины, ул. Маршака, 50, г. Кривой Рог, Украина, 50089, olyalis080991@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9746-7488>