

УДК 633.174:661.848

## Вплив солей кадмію на ріст і розвиток сорго (*Sorghum*) у культурі *in vitro*

 В. І. Войтовська<sup>1</sup>,  Т. П. Новікова<sup>2</sup>,  О. П. Манзій<sup>2</sup>,  Л. І. Воєвода<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України, вул. Клінічна, 25, м. Київ, 03110, Україна, \*e-mail: vvojtovska6@gmail.com

<sup>2</sup>Уманський державний педагогічний університет ім. Павла Тичини, вул. Садова, 2, м. Умань, Черкаська обл., 20300, Україна

<sup>3</sup>Уманський національний університет садівництва, вул. Інститутська, 1, м. Умань, Черкаська обл., 20300, Україна

**Мета.** Установити вплив різних концентрацій солей кадмію на ріст і розвиток пагонів різних видів сорго в умовах *in vitro* та провести добір толерантних форм у процесі створення вихідного матеріалу, стійкого до абіотичних чинників. **Методи.** Досліджували різні види сорго: зернове, віничне, суданське та сориз. За контроль брали сорго звичайне (двокольорове) сорту 'Степовий 8'. Живильні середовища готували за стандартним прописом Мурасіге – Скуга. Насіння сорго стерилізували за допомогою комерційного розчину Білізні. Клональне мікророзмноження проводили шляхом прямої селекції із додаванням хлориду ( $\text{CdCl}_2$ ) та сульфату ( $\text{CdSO}_4$ ) кадмію у концентраціях від 1,0 до 45,0 мг/л. Одержані в результаті культивування пагони оцінювали на 3 та 7 добу, зокрема фіксували відсоток життєздатних, некротичних і загиблих пагонів, а також їх біометричні показники. **Результати.** Рівень стійкості рослин сорго варіював залежно як від виду культури, так і типу солі кадмію та її концентрації. Найвищою стійкістю відзначається сорго суданське, тоді як найчутливішим є сорго віничне. Ця тенденція простежувалась у разі застосування як хлориду, так і сульфату кадмію. За концентрації  $\text{CdCl}_2$  10,0 мг/л життєздатність пагонів в усіх варіантах залишалася високою (від 82 до 95 %). Підвищення концентрації до 15,0 мг/л спричинило зниження життєздатності до 70–87 %, а при 20,0 мг/л – до 44–54 %. Концентрації 30,0 мг/л і більше були критичними, життєздатність пагонів зменшувалась до 2–12 %. Максимально токсична концентрація (45,0 мг/л) призвела до загибелі всіх пагонів сорго віничного. За аналогічних умов застосування в середовище  $\text{CdSO}_4$  було менш токсичним. Зокрема, за концентрації 10,0 мг/л життєздатність становила 90–98 %, а 15,0 мг/л – 80–95 %. І навіть за високих концентрацій (20,0–25,0 мг/л) життєздатність залишалася вищою порівняно з  $\text{CdCl}_2$ , а максимальні концентрації призводили до збереження невеликої частки життєздатних пагонів (до 6 %). Некротичні пагони почали з'являтися за концентрацій  $\text{CdCl}_2$  від 7,5 мг/л, причому найбільший відсоток некрозів зафіксовано у рослин сорго віничного. Для  $\text{CdSO}_4$  некротизація була менш вираженою навіть за високих концентрацій (10,0–17,5 мг/л), що свідчить про менший токсичний ефект цієї солі. За низьких концентрацій солей кадмію (1,0–5,0 мг/л) кількість новоутворених пагонів у всіх варіантах була високою.  $\text{CdSO}_4$  сприяв більшій кількості новоутворень порівняно з  $\text{CdCl}_2$ . У варіанті з 1,0 мг/л новоутворених пагонів було від 7 до 18 шт., тоді як при концентрації 15,0 мг/л цей показник знизився до 2–10 шт. **Висновки.** Для отримання життєздатних пагонів сорго у середовищах із кадмієм доцільно використовувати  $\text{CdSO}_4$  як менш токсичну альтернативу. Найкращі результати спостерігаються за концентрацій до 10,0 мг/л, зокрема для сорго суданського та соризу. У селекційній роботі доцільно враховувати видові особливості стійкості сорго до дії важких металів, приділяючи особливу увагу сорго суданському як найбільш толерантному виду.

**Ключові слова:** види сорго; іони металів; кадмій; концентрації; життєздатні й некротичні пагони; біометричні показники.

### Вступ

Важкі метали належать до найбільш поширених і небезпечних забруднювачів довкілля, зумовлюючи серйозні екологічні та біологічні наслідки. Їх накопичення в навколишньому середовищі спричиняється діяльністю промислових підприємств, сільського господарства,

транспорту та інших антропогенних факторів [1, 2]. Вплив важких металів є багатограним і поширюється як на рослинні організми, так і на здоров'я людей та тварин [3, 4]. Для рослин такі елементи є потужними стресовими факторами, що призводять до порушення фізіологічних процесів, зниження врожайності та погіршення якісних і технологічних показників продукції. Тривала дія високих концентрацій важких металів може спричинити деградацію рослинних екосистем і навіть загибель окремих рослин, що надалі негативно впливає на стійкість агроекосистем і біорізноманіття загалом [5, 6]. У зв'язку із цим виникає потреба у глибокому розумінні механізмів дії важких металів на рослини, що сприятиме розробленню ефективних заходів зменшення їхнього впливу та підвищенню стійкості сучасних агрофітоценозів.

Актуальними сьогодні є наукові дослідження, спрямовані на вивчення реакції рослин на вплив важких металів в умовах *in vitro*, адже вони дають змогу глибокого аналізу дії стресових факторів навіть у незначних концентраціях. Методологія *in vitro* дозволяє моделювати контрольовані умови, що є надзвичайно важливим для точного визначення рівня токсичності та адаптаційних можливостей рослин. Такий підхід забезпечує унікальні можливості для вивчення молекулярних, клітинних та фізіологічних реакцій, які неможливо дослідити в польових умовах через вплив багатьох неконтрольованих факторів [7–9].

Використання методології *in vitro* відкриває широкі можливості для аналізу токсичної дії важких металів на рослини. Це дає змогу не лише оцінити рівень токсичності, але й детально дослідити особливості росту й розвитку конкретних культур за контрольованих умов.

Вивчення впливу кадмію на рослини в умовах *in vitro* підтверджує значення такого підходу для розуміння стресових реакцій культур. Зокрема, дослідження В. І. Редько [10] показали, що солі кадмію, як-от  $\text{CdCl}_2$  і  $\text{CdSO}_4$ , у штучних умовах негативно впливають на життєздатність рослин, зокрема буряків цукрових. За концентрації 10 мг/л брунькоутворення у буряків не відбувалось, і цей рівень був критичним для всіх варіантів досліду. Особливо важливо відзначити, що вплив  $\text{CdCl}_2$  був значно сильнішим порівняно з  $\text{CdSO}_4$ . Крім того, накопичення кадмію у 23 досліджуваних видів рослин відбувалось переважно у коренях, що вказує на специфіку метаболічної реакції та адаптації до стресу на клітинному рівні.

Результати досліджень [11, 12] також свідчать про часозалежний вплив солей кадмію на метаболічну активність рослинних клітин. Зокрема, за наявності хлориду кадмію ( $\text{CdCl}_2$ ) у середовищі відновлення клітинної проліферації спостерігалось лише протягом перших 3–6 годин культивування. Проте подовження експозиції до 48–72 годин призводило до вираженого цитотоксичного ефекту, що супроводжувалось значним зниженням інтенсивності клітинного поділу. Ця зміна проліферації клітин на пряму залежала від тривалості дії кадмію і супроводжувалась порушеннями метаболічних процесів, що вказує на його системний вплив на життєдіяльність клітин.

Експериментальні дослідження додатково підтверджують високу токсичність іонів  $\text{Cd}^{2+}$  навіть у низьких концентраціях. Зокрема, при впливі 12,5 мкМ  $\text{Cd}^{2+}$  на суспензійну культуру *Datura innoxia* життєздатною залишалась лише одна клітина зі 105 [13]. Подібно, у дослідах із хлоридом барію ( $\text{BaCl}_2$ ) на калюсних структурах спостерігали повну відсутність регенерації та поділу клітин уже за концентрації 1,0 мМ. Це підкреслює критичну роль дозування важких металів у впливі на клітинну життєздатність та проліферацію [14].

Суттєве зниження росту рослин навіть у межах невеликих концентрацій демонструють дослідження впливу кадмію на біомасу рослин *Solanum tuberosum* L. Зокрема, у культурі *in vitro* після 7 діб експозиції кадмію ( $\text{Cd}^{2+}$ ) за концентрацій 0, 100, 200, 300, 400 і 500 мкМ у сортів картоплі 'Asterix' і 'Masaca' спостерігалось значне уповільнення наростання біомаси. Подовження часу культивування до 22 діб призводило до ще більш вираженого негативного ефекту, зокрема, зниження вмісту та засвоєння елементів живлення в коренях і пагонах. Це вказує на системний характер порушень, викликаних кадмієм [15].

Дослідження впливу кадмію на клітини *in vitro* у гемолімфі мідій (*Mytilus galloprovincialis*) показали, що після 24 годин експозиції за концентрації 100 мкМ відбувалися значні порушення актинового цитоскелета. Окрім цього, спостерігалось суттєве зниження життєздатності клітин, а також активне стимулювання фагоцитарної та лізосомної активності в гемокитах [16].

Кадмій відзначається високою рухливістю та токсичністю, що підтверджують численні дослідження. Зокрема, в експериментах із *Vaccinium corymbosum* L. концентрації  $\text{Cd}^{2+}$  50 і 100 мкМ протягом 7, 14 і 21 доби спричиняли зміни у вмісті фенольних сполук у середовищі. Установлено,

що пагони лохини під впливом кадмію збільшували синтез фенольних сполук незалежно від його концентрації, що може свідчити про адаптаційний механізм у відповідь на стрес [17].

У культурі *in vitro* на прикладі *Alyssum montanum* і *Daphne jasminea* було вивчено вплив кадмію в концентраціях 0,5; 2,5 та 5,0 мкМ упродовж 16 тижнів. Результати показали, що низькі концентрації кадмію пригнічували укорінення, проте сприяли приросту біомаси. Крім того, встановлено, що *D. jasminea* накопичувала значно більшу кількість кадмію в коренях порівняно з *A. montanum* [18].

За даними Е. Muszyńska [19], низькі концентрації кадмію, зокрема 1,0 мкМ, у середовищі, мали позитивний вплив на рослині культури. Додавання кадмію сприяло підвищенню вмісту фотосинтетичних пігментів, що, ймовірно, було пов'язано з високим вмістом калію у середовищі, який використовували для інгібування фенольних сполук.

Водночас, інші дослідження підтверджують токсичний вплив кадмію за вищих концентрацій. У культурі *in vitro* було виявлено, що кадмій у дозах 0, 2 і 20 мкМ значно знижує кількість ооцитів у стані спокою через їхню дегенерацію. Особливо при концентрації 20 мкМ життєздатність клітин знижувалася до 35,6% ( $P < 0,01$ ), що свідчить про виражену токсичність цього елемента [20].

Дослідження на калюсах *Brassica juncea* показали, що за концентрації кадмію 200 мкМ у живильному середовищі толерантність рослин знижувалась на 73,61 та 74,76 %. Крім того, за різних концентрацій кадмію, від 5 до 200 мкМ, рослини демонстрували підвищену активацію механізмів детоксикації, що є типовою адаптивною реакцією на стресові умови [21, 22].

Кадмій має здатність накопичуватися в декоративних і лікарських рослинах. У дослідженнях з нарцисом тазеттовим (*Narcissus tazetta*) у культурі *in vitro* за концентрацій кадмію 0,5 та 1,0 мМ через 21 добу вміст кадмію у коренях становив відповідно 2778,13; 801,87 та 162,83 мкг/г сухої маси. Водночас у цибулинах і листках накопичення кадмію не спостерігалось. Високий індекс толерантності свідчить про перспективність цієї рослини як фітостабілізатора для вилучення кадмію із забруднених середовищ [23–25].

Інші дослідження [26] вказують на неоднорідність впливу кадмію на калусні тканини та регенеровані пагони *Solanum nigrum*. Калусні форми виявилися більш стійкими до токсичного впливу кадмію, тоді як регенеровані пагони зазнавали стресу незалежно від концентрації чи тривалості експозиції.

Таким чином, оскільки розуміння реакцій рослин на важкі метали є ключовим для розроблення ефективних стратегій їхньої адаптації, дослідження в умовах *in vitro* стають важливим інструментом для вивчення специфічних відповідей на стрес.

**Мета досліджень** – установити вплив різних концентрацій солей кадмію на ріст і розвиток пагонів різних видів сорго в умовах *in vitro* та провести добір толерантних форм у процесі створення вихідного матеріалу, стійкого до абіотичних чинників.

### Матеріали та методика досліджень

Дослідження проводили в лабораторії біотехнології Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН (м. Київ). Основні етапи експериментальної роботи передбачали ретельну підготовку лабораторного обладнання, посуду та матеріалів, що забезпечило належні умови для проведення досліджень.

#### Підготовка середовищ для культури

Для приготування живильних середовищ використовували маточні розчини макроелементів, які готували у концентрації, вдесятеро вищій, ніж потрібно для створення середовищ. Такі розчини зберігалися в холодильнику за температури  $4 \pm 1$  °C і мали термін зберігання не більше двох місяців. Складники мікроелементів та вітамінів підготовляли заздалегідь у концентрації в 100 разів більшій за потрібну, після чого зберігали в замороженому стані. Усі компоненти живильного середовища були змішані відповідно до стандартного пропису Мурасіге – Скуга, після чого середовища стерилізували в автоклаві за тиску 1,2 атм. й тривалості стерилізації у три етапи: 15, 15 і 20 хв, між якими проводили повне зниження тиску [27, 28].

#### Підготовка матеріалу для експериментів

Для проведення досліджень використовували різні види сорго: зернове, віничне, суданське та сориз. Контрольним варіантом було обрано сорго звичайне (двокольорове) сорту 'Степовий 8'. Попередньо насіння всіх видів сорго обробляли для видалення потенційних патогенів: промивали у розчині нейтрального мийного засобу, а потім у чистій воді. Далі здійснювали стерилізацію

насіння комерційним розчином Білизни (35 % активного хлору) протягом 45 хв. Після стерилізації насіння тричі промивали дистильованою водою для повного видалення залишків мийного засобу та хлорного розчину. Після стерилізації насіння висаджували на живильне середовище в умовах стерильності [29].

#### *Культивування і методика клонального мікророзмноження*

Після підготовки насіння культури висаджували на живильне середовище, модифіковане за прописом Мурасіге – Скуга, по 10 пагонів у кожен колбу. Кожен варіант повторювався п'ять разів для забезпечення статистичної значущості результатів. Для проведення клонального мікророзмноження застосовували метод прямої селекції, де в середовище додавали солі кадмію ( $\text{CdCl}_2$  та  $\text{CdSO}_4$ ) у різних концентраціях – від 1,0 до 50,0 мг/л. Контрольна група була створена з пагонів сорго зернового, які не піддавалися впливу важких металів.

#### *Умови росту та догляд за культурами*

Експериментальні культури вирощували в умовах контрольованого середовища з температурою  $24 \pm 2$  °C і фотоперіодом 16/8 годин, що забезпечувало оптимальні умови для фотосинтетичної активності. Інтенсивність освітлення становила 4000–4500 люкс, відносна вологість повітря підтримувалася в межах 70–80 %. Ці умови забезпечували належне зростання та розвиток культуральних рослин в умовах лабораторного культивування.

#### *Спостереження та оцінювання результатів*

Протягом експерименту проводили регулярні обліки та спостереження за ростом і розвитком культуральних пагонів. Оцінювали відсоток життєздатних, нежиттєздатних і некротичних пагонів для визначення стійкості до важких металів. Додатково фіксували кількість новоутворених пагонів та їхню висоту у збережених культуральних рослин, які пересаджували на нове селективне середовище [30]. Статистичний аналіз експериментальних даних проводили методом дисперсійного аналізу з використанням пакету прикладних програм Exel та Statistica 10 [31].

### **Результати досліджень**

Незалежно від концентрацій і солі кадмію найчутливішими до їх дії пагони були в сорго віничного, а найстійкіші – у сорго суданського.

За концентрації  $\text{CdCl}_2$  10,0 мг/л на третю добу культивування було отримано від 82 до 95 % пагонів. У контрольному варіанті життєздатність пагонів була на рівні 93 %, у сорго суданського – 95, у соризу й сорго зернового – 90 і найменше у сорго віничного – 82 %. Зі збільшенням концентрації до 15,0 мг/л у досліджуваних зразків сорго цей показник становив від 70 до 87 %. Зокрема, 87 % на контролі, у варіантах із сорго суданським і зерновим – 85 та 70 % у сорго віничного.

Більш токсичною для рослин була концентрація 20,0 мг/л – у всіх варіантах кількість життєздатних пагонів варіювала від 44 до 54 %. Як і за менших концентрацій, найвищі показники були на контролі – 54 % та сорго суданського й сорго зернового – 50 %, дещо нижчі в соризу – 47 % і найменші у сорго віничного – 44 %.

У варіанті з концентрацією кадмію 25,0 мг/л зменшення життєздатних пагонів було в межах від 22 до 31 %.

Концентрація 30,0 мг/л була для досліджуваних видів сорго досить згубною, тож кількість життєздатних пагонів становила від 12 до 22 %. У контрольному варіанті їх було отримано 18 %, у сорго суданського – 22, соризу – 19, сорго зернового та віничного – 16 і 12 % відповідно.

Збільшення  $\text{CdCl}_2$  до 35,0 мг/л спричинювало ще істотніше зниження показників життєздатності пагонів: у варіанті із сорго суданським і на контролі – 12 і 10 % відповідно, а у досліджуваних варіантах із сорго зерновим – 8, соризом – 7 і найменше у сорго віничного – 5 %.

Максимально токсичними в середовищі MS були концентрації 40,0 і 45 мг/л, де відсоток життєздатних пагонів був мінімальним – 2–8. Зокрема, у контролі за таких умов показники становили 8 і 2 %, сорго суданське – 5 і 3, сорго зернове – 5 і 2 %, сориз – 4 і 3 % і сорго віничне – 2 % та всі рослини загинули за 45,0 мг/л (табл. 1).

Значно вищою, порівняно з  $\text{CdCl}_2$ , була життєздатність пагонів досліджуваних видів сорго за додавання у живильне середовище  $\text{CdSO}_4$ . Зокрема, за норми  $\text{CdSO}_4$  10,0 мг/л відсоток життєздатних пагонів був від 90 до 98. Як і у дослідженнях із  $\text{CdCl}_2$ , встановлено такі ж закономірності: зі збільшенням концентрації зростає відсоток загибелі пагонів, причому найменш толерантними є сорго віничне та суданське.

## Вплив концентрації кадмію на життєздатність пагонів сорго на третю добу культивування, %

Матеріал	Концентрація, мг/л							
	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0
CdCl <sub>2</sub>								
Контроль	93	87	54	31	18	10	8	2
Сорго зернове	90	85	50	27	16	8	5	2
Сорго віничне	82	70	44	22	12	5	2	–
Сориз	90	83	47	25	19	7	4	3
Сорго суданське	95	85	50	27	22	12	5	3
НІР <sub>0,05</sub>	0,4	0,7	0,4	0,5	0,5	0,4	0,3	0,1
CdSO <sub>4</sub>								
Контроль	97	93	70	53	33	25	10	4
Сорго зернове	95	90	67	55	27	20	8	4
Сорго віничне	90	80	64	43	20	12	7	2
Сориз	96	95	65	58	25	17	10	5
Сорго суданське	98	95	77	65	29	25	12	6
НІР <sub>0,05</sub>	0,2	0,3	0,5	0,7	0,8	0,6	0,5	0,3

Очікувано найвищий відсоток життєздатних пагонів – від 80 до 95 отримано за концентрації солі кадмію 15,0 мг/л, зокрема: сориз і сорго суданське – 95 %, контроль – 93, сорго зернове – 90, сорго віничне – 80 %.

Введення в середовище концентрацій CdSO<sub>4</sub> 20,0 і 25,0 мг/л зумовлює зниження стійкості і, як наслідок, зменшення життєздатних пагонів сорго. Зокрема, сорго суданське за досліджуваних норм забезпечило життєздатність на рівні 77 і 65 %, контроль – 70 і 53, сорго зернове – 67 і 55, сориз – 65 і 58 і сорго віничне – 64 і 43 % відповідно.

Істотне зменшення показників відмічено за концентрацій 30,0 і 35,0 мг/л CdSO<sub>4</sub>. Зокрема, за таких умов найвищі показники отримано в контрольному варіанті – 33 і 25 %, сорго суданського – 29 і 25, сорго зернового – 27 і 20, соризу – 25 і 17 і найменші в сорго віничного – 12 і 7 % відповідно.

Вміст CdSO<sub>4</sub> 40,0 мг/л життєздатних пагонів: у сорго суданське – 12 %, сорго зернове й контроль – 10, сориз – 8 і сорго віничне – 7 %. За максимальної концентрації – 45,0 мг/л кількість життєздатних пагонів за варіантами не перевищувала 6 % (табл. 1).

Ураховуючи попередні дані було зменшено й досліджено концентрації від 1,0 до 17,7 мг/л за культивування до 7 доби. Зокрема, за найменшої концентрації 1,0 мг/л CdCl<sub>2</sub> було отримано життєздатних пагонів від 95 до 100 %. Найвищі показники відповідно у сорго суданського і на контролі – 100 %, сориз і зернове – 98 і 97, віничне – 95 %.

Доцільно відмітити, що некротичних пагонів не відмічено за концентрацій 1,0 і 2,5 мг/л і майже на 5,0 мг/л (лише у сорго віничного 5 %).

Незначні зміни показників порівняно з мінімальною нормою відзначено за додавання в середовище 2,5 і 5,0 мг/л CdCl<sub>2</sub>: від 92 до 100 %.

У разі збільшення концентрації до 7,5 мг/л в усіх варіантах досліджування спостерігалась поява некротичних пагонів та, відповідно, зниження життєздатності. Зокрема: сорго суданське – 94 і 5 %, контроль – 90 і 7 %, сориз – 92 і 5 %, зернове – 82 і 10 %, віничне – 74 і 17 %.

Не виявлено істотної різниці у показниках між варіантами застосування 10,0 і 12,5 мг/л. Зокрема, на контролі визначено 78 і 72 % життєздатних та 12 і 15 % некротичних пагонів, сорго суданське – 75 і 72 % та 10 і 17 %, сориз – 73 і 70 та 10 і 20 %, сорго зернове – 70 і 66 та 20 і 25 %, сорго віничне – 62 і 55 та 27 і 30 % (табл. 2).

Введення 15,0 мг/л забезпечує отримання таких показників: сорго суданське – 70 %, контроль – 68, сорго зернове і сориз – 65, віничне – 60 %. Із них некротичних пагонів було від 18 до 33 %.

Збільшення концентрації до 17,5 мг/л призвело до значного збільшення некротичних і загиблих пагонів сорго. Зокрема, на контролі життєздатних було лише 41 % і некротичних – 37 %, сорго суданське – 45 і 25 %, сорго зернове – 45 і 42 %, сориз – 40 і 34 %, сорго віничне – 22 і 50 % відповідно (табл. 2).

**Культивування рослин роду Сорго на 7 добу  
залежно від концентрації CdCl<sub>2</sub>, %**

Матеріал	Концентрація, мг/л							
	1,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5
Життєздатні пагони								
Контроль	100	100	95	90	78	72	68	41
Сорго зернове	97	95	92	82	70	66	65	45
Сорго віничне	95	93	88	74	62	55	60	22
Сориз	98	96	95	92	73	70	65	40
Сорго суданське	100	100	97	94	75	72	70	45
НІР <sub>0,05</sub>	0,3	0,4	0,5	0,7	0,5	0,8	0,5	0,7
Некротичні пагони								
Контроль	–	–	–	7	12	15	18	37
Сорго зернове	–	–	–	10	20	25	29	42
Сорго віничне	–	–	5	17	27	30	33	50
Сориз	–	–	–	5	10	20	25	34
Сорго суданське	–	–	–	5	10	17	20	25
НІР <sub>0,05</sub>	–	–	–	0,7	0,6	0,8	0,6	0,5

Установлено, що за додавання CdSO<sub>4</sub> було отримано більшу кількість життєздатних пагонів та меншу некротичних в усіх досліджуваних варіантах.

Додавання у середовище від 1,0 до 5,0 мг/л кадмію забезпечувало високий відсоток життєздатних пагонів – від 85 до 100, та характеризувалося відсутністю некротичних клонів. Некротичні пагони відмічено за введення 7,5 мг/л CdSO<sub>4</sub>, хоча їх кількість була незначною – від 3 до 8 % та за 10,0 мг/л – від 5 до 15 % відповідно.

Концентрація 7,5 і 10,0 мг/л у середовищі містила життєздатних пагонів від 71 до 98 %. У сорго суданського було за цих концентрацій 98 і 85 %, соризу – 96 і 82 %, на контролі – 92 і 85 %, сорго зернового – 94 і 80 % і сорго віничного – 90 і 71 % (табл. 3).

Таблиця 3

**Культивування рослин роду Сорго  
на 7 добу залежно від концентрації CdSO<sub>4</sub>, %**

Матеріал	Концентрація, мг/л							
	1,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5	15,0	17,5
Життєздатні								
Контроль	100	100	100	95	92	85	80	58
Сорго зернове	100	97	94	90	94	80	70	45
Сорго віничне	96	90	85	80	90	71	53	32
Сориз	100	95	92	86	96	82	73	47
Сорго суданське	100	100	100	100	98	85	80	50
НІР <sub>0,05</sub>	0,1	0,5	0,7	0,8	0,6	0,5	0,8	0,5
Некротичні								
Контроль	–	–	–	3	5	10	15	32
Сорго зернове	–	–	–	3	10	13	18	41
Сорго віничне	–	–	–	8	15	17	27	58
Сориз	–	–	–	8	5	10	12	35
Сорго суданське	–	–	–	–	1	5	10	37
НІР <sub>0,05</sub>	–	–	–	0,6	0,3	0,6	0,6	0,5

Незначне зменшення відмічено за концентрації 15,0 мг/л і у дослідних варіантів були такі показники: сорго суданське – життєздатні – 80 і некротичні – 10 %, контроль – 80 і 15 %, сориз – 73 і 12 %, зернове – 70 і 18%, віничне – 53 і 27 %.

Значне збільшення некротичних та загиблих пагонів було виявлено в разі збільшення концентрації кадмію до 17,5 мг/л – від 32 до 58 % (табл. 3).

Важливим є кількість новоутворених пагонів, залежно від впливу та концентрації кадмію. Як впливає з даних таблиці 4, кількість пагонів була вищою за додавання CdSO<sub>4</sub>, ніж за CdCl<sub>2</sub>. В усіх

варіантах досліду за концентрацій 20,0 і 25,0 мг/л не відзначено новоутворених клонів усіх досліджених видів сорго.

Дослідження концентрації 1,0 мг/л вказує, що кількість новоутворених пагонів не залежно від солі кадмію варіювала від 7 до 18 шт. Відзначено лише тенденцію до зниження показників у варіантах застосування CdCl<sub>2</sub>.

Концентрації 3,0 і 5,0 мг/л вказують, що за додаванні CdCl<sub>2</sub> на контрольному варіанті кількість становила 13 і 12 шт., сорго суданське – 15 і 13 шт., сориз – 16 і 13 шт., зернового – 12 і 10 шт., віничного – 6 і 5 шт.

Збільшення концентрацій 8,0 і 10,0 мг/л істотно зменшувала в подальшому отримання нових пагонів в усіх досліджуваних матеріалів. Зокрема, новоутворених пагонів відмічено у сорго зернового та контролі і соризу – 8 шт., сорго суданське – 12 і 10 шт., а найменше у сорго віничного – 5 і 3 шт. відповідно.

У разі застосування норми до 15,0 мг/л у варіанті із сорго суданським і на контролі кількість новоутворених пагонів становила 8 і 7 шт., сорго зерновим – 6, соризом – 5, а сорго віничним – 2 шт.

Вплив солі CdSO<sub>4</sub> за концентрації 1,0 і 3,0 мг/л становили у досліджуваних видів: сорго суданське – 18 і 16 шт., контроль – 16 і 14 шт., сориз – 15 і 13 шт., зернове – 12 і 10 шт., віничне – 8 і 7 шт.

Аналізуючи концентрації 5,0 і 8,0 мг/л встановлено, що найвищі показники були у сорго суданського (13 і 10 шт.) і в контрольному варіанті (12 і 10 шт.), дещо нижчі у соризу (10 шт.) і зернового (8 і 6 шт.), а найменші у віничного (6 і 5 шт.).

Кількість новоутворених пагонів у варіантах застосування CdSO<sub>4</sub> у нормах 10,0 і 15,0 мг/л: контроль – 10 і 9 шт., сорго суданське – 10 і 8 шт., сориз – 8 і 7 шт., зернове – 5 шт., віничне – 5 і 3 шт. (табл. 4).

Таблиця 4

**Кількість новоутворених пагонів сорго залежно від концентрації солей кадмію, шт.**

Матеріал	Концентрація, мг/л							
	1,0	3,0	5,0	8,0	10,0	15,0	20,0	25,0
CdCl <sub>2</sub>								
Контроль	15	13	12	10	8	7	1	–
Сорго зернове	15	12	10	8	8	6	–	–
Сорго віничне	7	6	5	5	3	2	–	–
Сориз	16	13	10	10	8	5	–	–
Сорго суданське	17	15	13	12	10	8	2	–
НІР <sub>0,05</sub>	0,8	0,6	0,5	0,8	0,7	0,2	0,1	–
CdSO <sub>4</sub>								
Контроль	16	14	12	10	10	9	1	–
Сорго зернове	12	10	8	6	5	5	1	–
Сорго віничне	8	7	6	5	5	3	–	–
Сориз	15	13	10	10	8	7	1	–
Сорго суданське	18	16	13	10	10	8	2	–
НІР <sub>0,05</sub>	0,8	0,4	0,5	0,7	0,6	0,5	0,1	–

Досліджуючи вплив солей кадмію на висоту рослин можна відзначити, що вони пригнічували пагони. Варто відзначити, що за концентрації 1,0 і 3,0 мг/л в усіх варіантах істотного пригнічення відмічено не було. Зокрема за додавання CdCl<sub>2</sub> висота пагонів варіювала від 10 до 20 см, CdSO<sub>4</sub> – від 14 до 27 см.

У варіантах з нормою 5,0 мг/л ці показники становили від 8 до 15 см за внесення CdCl<sub>2</sub> та від 12 до 25 см – CdSO<sub>4</sub>. Додавання 8,0 і 10,0 мг/л зменшувало висоту від 7 до 23 см. Вплив CdCl<sub>2</sub> на досліджувані рослини був більш пригнічуючим, тож у контрольному варіанті їх висота була 12 і 10 см, у сорго суданського – 15 і 13 см, соризу й сорго зернового – 10 і 8 см, сорго віничного – 7 і 6 см. У середовищі із CdSO<sub>4</sub> за досліджуваних концентрацій було встановлено такі показники: контроль – 16 і 14 см, сорго суданське – 23 і 20 см, сориз – 20 і 16 см, зернове – 20 і 12 см, віничне – 10 і 8 см.

У варіанті з концентрацією кадмію 15,0 мг/л висота рослин становила від 5 до 10 см та від 6 до 16 см залежно від солі. Висота пагонів за концентрацій 20,0 і 25,0 мг/л була значно меншою – від 3 до 12 см (табл. 5).

## Висота пагонів сорго залежно від концентрації солей кадмію, см

Матеріал	концентрація, мг/л							
	1,0	3,0	5,0	8,0	10,0	15,0	20,0	25,0
CdCl <sub>2</sub>								
Контроль	20	17	15	12	10	8	6	3
Сорго зернове	17	14	12	10	8	6	4	3
Сорго віничне	13	10	8	7	6	5	3	3
Сориз	15	12	10	10	8	7	5	3
Сорго суданське	22	20	17	15	13	10	6	4
НІР <sub>0,05</sub>	0,4	0,7	0,8	0,5	0,6	0,7	0,2	0,1
CdSO <sub>4</sub>								
Контроль	22	20	20	16	14	12	8	5
Сорго зернове	24	22	22	20	12	10	6	4
Сорго віничне	16	14	12	10	8	6	4	3
Сориз	25	23	20	20	16	14	10	6
Сорго суданське	27	25	25	23	20	16	12	8
НІР <sub>0,05</sub>	0,5	0,8	0,4	0,5	0,7	0,4	0,5	0,2

Таким чином, досліджено вплив солей кадмію на біометричні показники роду Сорго та відібрано їх толерантні форми.

### Висновки

Серед досліджених видів сорго найнижчу толерантність мали пагони сорго віничного, а найвищу – сорго суданського незалежно від концентрацій і солі кадмію чи тривалості культивування.

На 3-тю добу культивування життєздатність пагонів за варіантами досліду варіювала від 82 до 95 % (10 мг/л) та від 70 до 87 % (15,0 мг/л), надалі їх життєздатність різко знижувалась.

Проаналізовано, що некротичних пагонів не відмічено за концентрацій 1,0 і 2,5 мг/л і майже у варіанті з 5,0 мг/л (лише 5 % у сорго віничного).

Збільшення концентрації до 17,5 мг/л призодило до значного збільшення некротичних і загинутих пагонів сорго і на контролі життєздатних було лише 41 % і некротичних – 37 %, сорго суданське – 45 і 25 %, сорго зернове – 45 і 42 %, сориз – 40 і 34 %, сорго віничне – 22 і 50 %.

Найоптимальнішою концентрацією солей кадмію є 10,0 та 15,0 мг/л.

### Використана література

- Wan Y., Liu J., Zhuang Z. et al. Heavy Metals in Agricultural Soils: Sources, Influencing Factors, and Remediation Strategies. *Toxics*. 2024. Vol. 12, Iss. 1. Article 63. doi: 10.3390/toxics12010063
- Mitra S., Chakraborty A. J., Tareq A. M. et al. Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University – Science*. 2022. Vol. 34, Iss. 3. Article. 101865. doi: 10.1016/j.jksus.2022.101865
- Sperdoui I. Heavy Metal Toxicity Effects on Plants. *Toxics*. 2022. Vol. 10, Iss. 12. Article 715. doi: 10.3390/toxics10120715
- Гриньова, Я. і Криштоп, Є. Проблеми забруднення навколишнього середовища важкими металами та шляхи їх подолання. *Інженерія природокористування*. 2021. № 1. С. 111–119. doi: 10.5281/zenodo.6904034
- Jorjani S., Pehlivan Karakaş F. Physiological and Biochemical Responses to Heavy Metals Stress in Plants. *International Journal of Secondary Metabolite*. 2024. Vol. 11, Iss. 1. P. 169–190. doi: 10.21448/ijsm.1323494
- DalCorso G., Manara A., Furini A. An overview of heavy metal challenge in plants: from roots to shoots. In *Metallomics*. 2013. Vol. 5, Iss. 9. Article 1117. doi: 10.1039/c3mt00038a
- Elazab D., Lambardi M., Capuana M. *In Vitro* Culture Studies for the Mitigation of Heavy Metal Stress in Plants. *Plants*. 2023. Vol. 12, Iss. 19. Article 3387. doi: 10.3390/plants12193387
- Jalmi S. K., Bhagat P. K., Verma D. et al. Traversing the Links between Heavy Metal Stress and Plant Signaling. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 9. doi: 10.3389/fpls.2018.00012
- Bidabadi S. S., Jain S. M. Cellular, Molecular, and Physiological Aspects of In Vitro Plant Regeneration. *Plants*. 2020. Vol. 9, Iss. 6. Article 702. doi: 10.3390/plants9060702



10. Редько В. І., Недяк Т. М., Драгунова О. К. Вплив солей кадмію на рослини цукрових буряків у культурі *in vitro*. *Наукові праці Інституту цукрових буряків*. 2005. № 8. С. 425–429.
11. Штапенко О. В., Гевкан І. І., Сливчук Ю. І. Особливості цитотоксичного впливу кадмію хлориду на клітини *in vitro*. *Біологія тварин*. 2018. № 20, № 1. С. 123–129.
12. Мирюта Н. Ю., Парнікоза І. Ю., Пороннік О. О. та ін. Рослини *Deschampsia antarctica* E.Desv. з різним числом хромосом в умовах вирощування *in vitro*. Ймовірнісні зв'язки трьох показників пристосовуваності між собою та з розміром геному. *Фактори експериментальної еволюції організмів*. 2017. № 20. С. 293–298.
13. Любченко І. О., Рябовол Л. О., Любченко А. І. Використання культури *in vitro* в адаптивній селекції рослин (огляд літератури). *Збірник наукових праць Уманського національного університету садівництва*. 2016. № 88(1). С. 126–139.
14. Рябовол Л. О., Любченко А. І., Єщенко О. В. Добір стійких до іонів  $Va^{2+}$  клітинних ліній цикорію коренеплідного та програмування їх морфогенної активності. *Збірник наукових праць УДАУ «Основи формування продуктивності сільськогосподарських культур за інтенсивних технологій вирощування»*. Київ, 2008. С. 370–374.
15. Gonçalves J. F., Mazzafera P., Costa A. Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2009. Vol. 47, Iss. 9. P. 814–821. doi: 10.1016/j.plaphy.2009.04.002
16. Olabarrieta I., Buesa J. A., Burguete T. *In vitro* effects of cadmium on two different animal cell models. *Toxicology In Vitro*. 2001. Vol. 15, Iss. 4–5. P. 511–517. doi: 10.1016/s0887-2333(01)00056-x
17. Manquián-Cerda K., Moya-León M. A., Pino M.-T. Effect of cadmium on phenolic compounds, antioxidant enzyme activity and oxidative stress in blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) plantlets grown *in vitro*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2016. Vol. 133. P. 316–326. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.07.029
18. Wiszniewska A., Hanus-Fajerska E., Ciarkowska K. Comparative assessment of response to cadmium in heavy metal-tolerant shrubs cultured *in vitro*. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2017. Vol. 228. P. 1–13. doi: 10.1007/s11270-017-3488-0
19. Muszyńska E., Hanus-Fajerska E., Ciarkowska K. Studies on lead and cadmium toxicity in *Dianthus carthusianorum* calamine ecotype cultivated *in vitro*. *Plant Biology*. 2018. Vol. 20, Iss. 3. P. 474–482. doi: 10.1111/plb.12712
20. Leoni G., Resta L., Fanelli R. Influence of cadmium exposure on *in vitro* ovine gamete dysfunction. *Reproductive Toxicology*. 2002. Vol. 16, Iss. 4. P. 371–377. doi: 10.1016/s0890-6238(02)00040-0
21. Chen X., Wang Y., Xu L. Effects of cadmium on osteoblasts and osteoclasts *in vitro*. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2009. Vol. 28, Iss. 2. P. 232–236. doi: 10.1016/j.etap.2009.04.010
22. Shekhawat G. S., Verma K., Rathore D. *In vitro* biochemical evaluation of cadmium tolerance mechanism in callus and seedlings of *Brassica juncea*. *Protoplasma*. 2010. Vol. 239. P. 31–38. doi: 10.1007/s00709-009-0079-y
23. Ashrafzadeh S., Leung D. W. M. Novel potato plants with enhanced cadmium resistance and antioxidative defence generated after *in vitro* cell line selection. *Plos One*. 2017. Vol. 12, Iss. 10. Article e0185621. doi: 10.1371/journal.pone.0185621
24. Soleimani S. H., Habibi D., Khosrowjerdi M. Cadmium accumulation and alkaloid production of *Narcissus tazetta* plants grown under *in vitro* condition with cadmium stress. *Plant Physiology Reports*. 2020. Vol. 25. P. 51–57. doi: 10.1007/s40502-019-00476-6
25. Fornazier R. F., Ferreira R. R., Vitoria A. P. Cadmium stress in sugar cane callus cultures: effect on antioxidant enzymes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2002. Vol. 71. P. 125–131. doi: 10.1023/A:1019917705111
26. Xu J., Yin H. X., Li X. Protective effects of proline against cadmium toxicity in micropropagated hyperaccumulator, *Solanum nigrum* L. *Plant Cell Reports*. 2009. Vol. 28. P. 325–333. doi: 10.1007/s00299-008-0643-5
27. Рябовол Л. О. Клональне мікророзмноження рослин: Метод. рекомендації для проведення лабораторно-практичних занять з «Біотехнології рослин». Умань : УДАА, 2001. 16 с.
28. Us-Camas R., Rivera-Solís G., Duarte-Aké F., De-la-Peña C. *In vitro* culture: an epigenetic challenge for plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2014. Vol. 118. P. 187–201. doi: 10.1007/s11240-014-0482-8
28. Войтовська В. І., Сторожик Л. І., Любич В. В., Третякова С. О. Вегетативне розмноження сорго цукрового і зернового: метод. рекоменд. Умань : УНУС, 2019. 17 с.
30. Івченко Т. В., Корнієнко С. І., Кондратенко С. І. та ін. Клітинні технології створення вихідного селекційного матеріалу основних овочевих рослин в культурі *in vitro* : метод. рекоменд. Харків : Плеяда, 2013. 47 с.
31. Бабак В. П., Білецький А. Я., Приставка П. О., Приставка О. П. Статистична обробка даних. Київ : МІВВЦ, 2001. 388 с.

## References

1. Wan, Y., Liu, J., Zhuang, Z., Li, Y., Wang, H., & Zhang, C. (2024). Heavy metals in agricultural soils: Sources, influencing factors, and remediation strategies. *Toxics*, 12(1), Article 63. doi: 10.3390/toxics12010063
2. Mitra, S., Chakraborty, A. J., Tareq, A. M., Ahmed, A., Emran, T. B., & Dhama, K. (2022). Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. *Journal of King Saud University – Science*, 34(3), Article 101865. doi: 10.1016/j.jksus.2022.101865
3. Sperdouli, I. (2022). Heavy metal toxicity effects on plants. *Toxics*, 10(12), Article 715. doi: 10.3390/toxics10120715
4. Hrynova, Y., & Kryshtop, Y. (2021). Problems of environmental pollution by heavy metals and ways to overcome them. *Environmental Engineering*, 1, 111–119. doi: 10.5281/zenodo.6904034
5. Jorjani, S., & Pehlivan Karakaş, F. (2024). Physiological and biochemical responses to heavy metals stress in plants. *International Journal of Secondary Metabolite*, 11(1), 169–190. doi: 10.21448/ijsm.1323494
6. DalCorso, G., Manara, A., & Furini, A. (2013). An overview of heavy metal challenge in plants: From roots to shoots. *Metallomics*, 5(9), Article 1117. doi: 10.1039/c3mt00038a
7. Elazab, D., Lambardi, M., & Capuana, M. (2023). In vitro culture studies for the mitigation of heavy metal stress in plants. *Plants*, 12(19), Article 3387. doi: 10.3390/plants12193387
8. Jalmi, S. K., Bhagat, P. K., Verma, D., Noryang, S., Tayyeba, S., & Singh, K. (2018). Traversing the links between heavy metal stress and plant signaling. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00012>
9. Bidabadi, S. S., & Jain, S. M. (2020). Cellular, molecular, and physiological aspects of in vitro plant regeneration. *Plants*, 9(6), Article 702. doi: 10.3390/plants9060702
10. Redko, V. I., Nediak, T. M., & Drahunova, O. K. (2005). The effect of cadmium salts on sugar beet plants in *in vitro* culture. *Scientific Papers of the Institute of Sugar Beet*, 8, 425–429. [In Ukrainian]
11. Shtapenko, O. V., Hevkan, I. I., & Slyvchuk, Y. I. (2018). Features of cytotoxic effects of cadmium chloride on cells *in vitro*. *Animal Biology*, 20(1), 123–129.
12. Miriuta, N. Y., Kovalchuk, S., Samokhvalov, D., & Popovych, T. (2017). Plants of *Deschampsia antarctica* E. Desv. with different chromosome numbers under *in vitro* cultivation: Probable links of three adaptability indicators among themselves and with genome size. *Experimental Evolution Factors of Organisms*, 20, 293–298. [In Ukrainian]
13. Liubchenko, I. O., Riabovol, L. O., & Liubchenko, A. I. (2016). The use of *in vitro* culture in adaptive plant breeding (literature review). *Collection of Scientific Works of Uman National University of Horticulture*, 88(1), 126–139. [In Ukrainian]
14. Riabovol, L. O., Liubchenko, A. I., & Yeshchenko, O. V. (2008). Selection of *Cichorium intybus* cell lines resistant to Ba<sup>2+</sup> ions and programming their morphogenic activity. In L. T. Kovalchuk (Ed.), *Principles of Productivity Formation of Agricultural Crops under Intensive Cultivation Technologies* (pp. 370–374). Kyiv: UDAU. [In Ukrainian]
15. Gonçalves, J. F., Mazzafera, P., & Costa, A. (2009). Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*, 47(9), 814–821. doi: 10.1016/j.plaphy.2009.04.002
16. Olabarrieta, I., Buesa, J. A., & Burguete, T. (2001). *In vitro* effects of cadmium on two different animal cell models. *Toxicology In Vitro*, 15(4–5), 511–517. doi: 10.1016/s0887-2333(01)00056-x
17. Manquián-Cerda, K., Moya-León, M. A., & Pino, M.-T. (2016). Effect of cadmium on phenolic compounds, antioxidant enzyme activity and oxidative stress in blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) plantlets grown *in vitro*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 133, 316–326. doi: 10.1016/j.ecoenv.2016.07.029
18. Wiszniewska, A., Hanus-Fajerska, E., & Ciarkowska, K. (2017). Comparative assessment of response to cadmium in heavy metal-tolerant shrubs cultured *in vitro*. *Water, Air, & Soil Pollution*, 228, 1–13. doi: 10.1007/s11270-017-3488-0
19. Muszyńska, E., Hanus-Fajerska, E., & Ciarkowska, K. (2018). Studies on lead and cadmium toxicity in *Dianthus carthusianorum* calamine ecotype cultivated *in vitro*. *Plant Biology*, 20(3), 474–482. doi: 10.1111/plb.12712
20. Leoni, G., Resta, L., & Fanelli, R. (2002). Influence of cadmium exposure on *in vitro* ovine gamete dysfunction. *Reproductive Toxicology*, 16(4), 371–377. doi: 10.1016/s0890-6238(02)00040-0
21. Chen, X., Wang, Y., & Xu, L. (2009). Effects of cadmium on osteoblasts and osteoclasts *in vitro*. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 28(2), 232–236. doi: 10.1016/j.etap.2009.04.010
22. Shekhawat, G. S., Verma, K., & Rathore, D. (2010). *In vitro* biochemical evaluation of cadmium tolerance mechanism in callus and seedlings of *Brassica juncea*. *Protoplasma*, 239, 31–38. doi: 10.1007/s00709-009-0079-y
23. Ashrafzadeh, S., & Leung, D. W. M. (2017). Novel potato plants with enhanced cadmium resistance and antioxidative defence generated after *in vitro* cell line selection. *Plos One*, 12(10), Article e0185621. doi: 10.1371/journal.pone.0185621

24. Soleimani, S. H., Habibi, D., & Khosrowjerdi, M. (2020). Cadmium accumulation and alkaloid production of *Narcissus tazetta* plants grown under *in vitro* condition with cadmium stress. *Plant Physiology Reports*, 25, 51–57. doi: 10.1007/s40502-019-00476-6
25. Fornazier, R. F., Ferreira, R. R., & Vitoria, A. P. (2002). Cadmium stress in sugar cane callus cultures: effect on antioxidant enzymes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 71, 125–131. doi: 10.1023/A:1019917705111
26. Xu, J., Yin, H. X., & Li, X. (2009). Protective effects of proline against cadmium toxicity in micropropagated hyperaccumulator, *Solanum nigrum* L. *Plant Cell Reports*, 28, 325–333. doi: 10.1007/s00299-008-0643-5
27. Riabovol, L. O. (2001). *Clonal micropropagation of plants: Methodical recommendations for conducting laboratory-practical classes in "Plant Biotechnology."* Uman: USAA.
28. Us-Camas, R., Rivera-Solís, G., Duarte-Aké, F., & De-la-Peña, C. (2014). *In vitro* culture: an epigenetic challenge for plants. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 118, 187–201. doi: 10.1007/s11240-014-0482-8
29. Voitovska, V. I., Storozhyk, L. I., Liubych, V. V., & Tretiakova, S. O. (2019). *Vegetative reproduction of sugar and grain sorghum: Methodical recommendations.* Uman: Uman National University of Horticulture.
30. Ivchenko, T. V., Korniienko, S. I., & Kondratenko, S. I. (2013). *Cellular technologies for creating initial breeding material of main vegetable plants in in vitro culture: Methodical recommendations.* Kharkiv: Pleiada. [In Ukrainian]
31. Babak, V. P., Biletskyi, A. Ya., Prystavka, P. O., & Prystavka, O. P. (2001). *Statistical data processing.* Kyiv: MIVVC. [In Ukrainian]

UDC 633.174:661.848

**Voitovska, V. I.<sup>1</sup>, Novikova, T. P.<sup>2</sup>, Manzii, O. P.<sup>2</sup>, & Voievoda, L. I.<sup>3</sup>** (2024). The Effect of Cadmium Salts on the *In Vitro* Growth and Development of Sorghum (*Sorghum*). *Advanced Agritechnologies*, 12(3). <https://doi.org/10.47414/na.12.3.2024.316783> [In Ukrainian]

<sup>1</sup>*Institute of Bioenergy Crops and Sugar Beet NAAS of Ukraine, 25 Klinichna St., Kyiv, 03110, Ukraine, \*e mail: vvojtovska6@gmail.com*

<sup>2</sup>*Pavlo Tychyna Uman State Pedagogical University, 2 Sadova St., Uman, Cherkasy region, 20300, Ukraine*

<sup>3</sup>*Uman National University of Horticulture, 1 Instytutska St., Uman, Cherkasy region, 20305, Ukraine*

**Purpose.** To determine the effect of different concentrations of cadmium salt on the growth and development of shoots of different sorghum species *in vitro* and to select tolerant forms for developing breeding genotypes resistant to abiotic factors. **Methods.** The study involved different sorghum species: grain, broomcorn, Sudan grass, and soryz. *Sorghum bicolor* cultivar 'Stepovyi 8' was used as a control. Nutrient media were prepared using the standard Murashige and Skoog (MS) formulation. Sorghum seeds were sterilized with a solution of Bilyzna (bleach). Clonal micropropagation was conducted through direct selection with the addition of cadmium chloride (CdCl<sub>2</sub>) and cadmium sulfate (CdSO<sub>4</sub>) at concentrations ranging from 1.0 to 45.0 mg/L. The resulting shoots were evaluated on days 3 and 7 for the percentage of viable, necrotic, and dead shoots, as well as their biometric parameters. **Results.** The tolerance levels of sorghum plants varied depending on the species, the type of cadmium salt, and the salt concentration. Sudan grass exhibited the highest tolerance, whereas broomcorn was the most sensitive. This trend was consistent for both cadmium chloride and cadmium sulfate. At a concentration of 10.0 mg/L CdCl<sub>2</sub>, shoot viability remained high in all treatments (82–95%). Increasing the concentration to 15.0 mg/L reduced viability to 70–87%, while at a concentration of 20.0 mg/L, it dropped to 44–54%. Concentrations of 30.0 mg/L and higher were critical, reducing shoot viability to 2–12%. The maximum toxic concentration (45.0 mg/L) caused the death of broomcorn shoots. In comparison, CdSO<sub>4</sub> demonstrated lower toxicity under similar conditions. At a concentration of 10.0 mg/L, shoot viability was 90–98%, while at a concentration of 15.0 mg/L, it was 80–95%. Even at higher concentrations (20.0–25.0 mg/L), viability remained higher compared to CdCl<sub>2</sub>, and the maximum concentrations provided survival of a small proportion of viable shoots (up to 6%). Necrotic shoots began to appear at CdCl<sub>2</sub> concentrations as low as 7.5 mg/L, with the highest percentage of necrosis recorded in broomcorn plants. CdSO<sub>4</sub> caused less necrosis, even at higher concentrations (10.0–17.5 mg/L), indicating its reduced toxicity. At low cadmium salt concentrations (1.0–5.0 mg/L), the number of newly formed shoots was high in all treatments. CdSO<sub>4</sub> promoted greater shoot formation compared to CdCl<sub>2</sub>. At 1.0 mg/L, the number of new shoots ranged from 7 to 18, while at 15.0 mg/L, this number decreased to 2–10. **Conclusions.** CdSO<sub>4</sub> is a less toxic alternative to obtain viable sorghum shoots in cadmium-containing media. The best results were observed at concentrations up to 10.0 mg/L, particularly for Sudan grass and soryz. Breeding programs should consider the species-specific tolerance of sorghum to heavy metals, with special attention to Sudan grass as the most tolerant species.

**Keywords:** *sorghum species; ions of metals; cadmium; concentrations; viable and necrotic shoots; biometric indicators.*

Надійшла / Received 12.11.2024  
Погоджено до друку / Accepted 03.12.2024