

УДК 631.8.022.08:631.547.2:633.17]:602.4  
DOI <https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2025.32.39>

## ВПЛИВ СОЛЕЙ КАДМІЮ НА РІСТ І РОЗВИТОК РОСЛИН РОДУ СОРГО У КУЛЬТУРИ IN VITRO

ЛЮБИЧ В.В. – доктор сільськогосподарських наук  
[orcid.org/0000-0003-4100-9063](https://orcid.org/0000-0003-4100-9063)

Уманський національний університет

ВОЙТОВСЬКА В.І. – кандидат сільськогосподарських наук  
[orcid.org/0000-0001-5538-461X](https://orcid.org/0000-0001-5538-461X)

Інститут біоенергетичних культур і цукрових буряків

**Постановка проблеми.** Розвиток науково-технічного прогресу зумовило забруднення навколишнього природного середовища важкими металами. Вони істотно впливають не лише рослинні об'єкти, але й на організм людини і тварини у цілому. У рослинах важкі метали призводять до зниженні якісних і технічних показників та пригнічення, а у деяких випадках і загибелі. Наукові роботи із вивчення рослин до дії важких металів в умовах in vitro є цінними, адже дозволяють дослідити стресові фактори у невеликих масштабах [1, 2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженнями Редько В. І. відмічено, що солі  $\text{CdCl}_2$  і  $\text{CdSO}_4$  у штучних умовах на цукрових буряках призводили до зниження життєздатності бруньок. Встановлено, що брунькоутворення у буряків не відбувалось за 10 мг/л і було згубним для усіх досліджуваних варіантів. Також відмічено дію  $\text{CdCl}_2$ , яка була більша, ніж  $\text{CdSO}_4$ . Вона вказує, що накопичення кадмію у коренях більше порівняно із стеблами [1].

Авторами вказується, що в присутності хлориду кадмію в середовищі відновлення клітинної проліферації спостерігалось протягом 3 і 6 годин, але більш тривала експозиція цієї сполуки (48 і 72 години) викликала цитотоксичний ефект. Визначено залежність проліферації клітин від часу культивування з використанням хлориду кадмію. Зниження інтенсивності клітинної проліферації, спричинене кадмієм хлоридом, супроводжувалось зміною метаболічних процесів у культурі клітин [2, 3].

Експериментальні дослідження на суспензійну культуру *Datura innoxia* дії іонів  $\text{Cd}^{2+}$  за концентрації 12,5 мкМ були згубними і життєздатність становила лише 1 клітина із 105. А в дослідях із хлоридом барію у калюсних структурах відмічено відсутність регенерації та поділу клітин за концентрації 1,0 мМ [4, 5].

Дослідження токсичності кадмію ( $\text{Cd}^{2+}$ ) у картоплі (*Solanum tuberosum* L.), на сортах Asterix і Macasa в культурі in vitro за концентрації від 0, 100, 200, 300, 400 і 500 мкМ дозволили вказати, що через 7 діб відмічено зниження наростання біомаси. Крім того, вказано, що  $\text{Cd}^{2+}$  знижував у коренях і в пагонах уміст та засвоєння елементів живлення за тривалого його культивування, а саме до 22 діб [6].

У дослідях впливу кадмію на клітин in vitro у крові мідій (*Mytilus galloprovincialis*) досліджено, що після 24 годин експозиції та експозиції 100 мкМ викликали порушення актинового цитоскелета. Крім того, життєздатність клітин істотно знижувалась і встановлено, що

$\text{Cd}$ , стимулює фагоцитарну та лізосомну активність у гемоцитах in vitro [7].

Науковці відзначають, що ( $\text{Cd}^{2+}$ ) дуже рухливий та токсичний. У своїх дослідженнях на *Vaccinium corymbosum* L. було введено концентрацію 50 і 100 мкМ протягом 7, 14 і 21 діб і встановили, що  $\text{Cd}^{2+}$  призводить до змін фенольних сполук. Пагони лохини збільшували фенольні сполуки за присутності  $\text{Cd}^{2+}$  незалежно від його концентрації [8].

У культурі in vitro досліджували *Alyssum montanum* і *Daphne jasminea* із концентрацією кадмію від 0,5, 2,5 і 5,0 мкМ упродовж 16 тижнів. Встановлено, що низькі концентрації кадмію пригнічували укорінення, однак сприяли приросту біомаси. *D. jasminea* містила більшу кількість  $\text{Cd}$  у коренях, порівняно із *A. montanum* та найбільшу кількість його відмічено в кореневій системі [9].

Muszyńska E. вказує, що кадмій позитивно впливав на культури із концентрацією у середовищі 1,0 мкМ. За його додавання відмічено збільшення фотосинтетичного пігменту. Однак вказують, що ймовірно така реакція рослин пов'язана із високим вмістом калію, який було додано в середовище для інгібування фенолів [10].

Науковцями підтверджено, що різні концентрації кадмію 0, 2 і 20 мкМ у культурі in vitro знижує кількість ооцитів у стані спокою. За досліджуваних концентрацій відбувалось дегенерація ооцитів. За введення  $\text{Cd}$  20 мкМ визначено значне зниження ( $P < 0,01$ ) життєздатності (35,6 %) клітин [11].

На калюсах *Brassica juncea* із 200 мкМ кадмію у живильному середовищі було визначено зниження толерантності на 74 % і 75 %. Вивчення пагонів за різних концентрацій кадмію від 5 до 200 мкМ вказує, що вони піддавалися вищій детоксикації [12, 13].

Кадмій здатний накопичуватися в декоративних і лікарських рослинах. У нарциса тазеттового в культурі in vitro вводили кадмій за концентрацій 0,5, 1,0 мМ і через 21 добу отримано 2778,13 і 801,87 мкг/г  $\text{Cd}$  у коренях. Однак у цибулинах і листках змін і накопичення не було відмічено. Індекс толерантності високий, що значить, що цю рослину можна використовувати, як фітостабілізатор для відновлення  $\text{Cd}$  із забруднених середовищ [14–16].

Дослідженнями відмічено, що вплив кадмію на калюси і регенеровані пагони *S. Nigrum* був не однако-вим. Так, калусні форми були більш стійкіші, а пагони піддавалися токсичному впливу кадмієм незалежно від концентрації і експозиції [17].

**Мета.** Дослідити вплив різних концентрацій солей кадмію на ріст і розвиток пагонів роду Соргових в умовах *in vitro* та провести добір толерантних форм при створенні стійкого до абіотичних чинників вихідного матеріалу.

**Матеріали та методика досліджень.** Дослідження проводили в Інституті біоенергетичних культур і цукрових буряків НААН України у лабораторії біотехнології. У лабораторних умовах були підготовлені інструменти, посуд, матеріали. Макроелементи готували у вигляді маточних розчинів, які у 10 разів мали більшу концентрацію, ніж потрібно для приготування середовищ. Їх зберігали у холодильнику за температури  $4 \pm 1$  °C терміном у 2 місяці. Розчини мікроелементів та вітамінів готували заздалегідь у 100 разів більш концентрованими і зберігали у замороженому стані. В подальшому згідно пропису MS готували за всіма складовими живильних середовищ, які стерилізували в автоклавах під тиском 1,2 атм. з проміжками часу 15+15+20 хв., між якими тиск повністю знімають [18, 19].

Для досліджень були різні рослини роду Сорго (*Sorghum*) та контроль – сорт сорго звичайного (двокольорове) Степовий 8 (сорго зернове). Насіння обраних сортів і гібридів сорго зернового попередньо промивали у розчині з нейтральним миючим засобом та у воді. Стерилізацію проводили комерційним розчином Білизни 35 % за експозиції 45 хв. і промивали декілька раз дистильованою водою. Стерильне насіння висаджували на розмноження [20].

На живильне середовище за прописом Мурасіге та Скуга з модифікаціями висаджували пагони сорго у кожну колбу по 10 шт. з повторністю по 5 колб. На етапі клонального розмноження в живильне середовище були додатково введені в різних концентраціях від 1,0 до 50,0 мг/л солі кадмію  $\text{CdCl}_2$  і  $\text{CdSO}_4$ .

Матеріал культивували за температурного режиму  $24 \pm 2$  °C при довжині фотоперіоду 16/8 годин з інтенсивністю освітлення 4000–4500 лк, відносній вологості 70–80 %.

Упродовж досліджень були проведені обліки і спостереження за ростом і розвитком культуральних

пагонів: визначали відсоток життєздатних та нежиттєздатних і некротичних. Культуральні рослини, які вижили під дією солей кадмію, пересаджували на нове селективне середовище, проводили підрахунок новоутворених пагонів і вимірювали висоту.

Цифровий матеріал та статистичний аналіз оброблено згідно з загальноприйнятими методами та за допомогою пакета прикладних програм [21].

**Результати досліджень.** Встановлено, що пагони сорго незалежно від концентрацій солей кадмію найбільш чутливі були у сорго вінікового, а найстійкіші у сорго-суданкового гібриду (табл. 1). Дослідження вказують, що за концентрацій  $\text{CdCl}_2$  10,0 мг/л було отримано на 3 добу культивування від 82 до 95 % пагонів. На контрольному варіанті життєздатні пагони становили 93 %, у сорго-суданкового гібриду 95 %, сориту та сорго зернового – 90 % і найменше у сорго вінікового – 82 %. Із збільшенням концентрації до 15,0 мг/л у досліджуваних зразків було отримано від 70 до 87 %. Найвищі показники відмічено на контролі (87 %), сорго-суданкового гібриду та сорго зернового (85 %), а найменші – в сорго вінікового (70 %).

Концентрація 20,0 мг/л була більш токсичнішою та на всіх варіантах відзначено від 44 до 54 % некротичних пагонів. Як і в попередніх дослідженнях найвищі показники були на контролі – 54 % та сорго-суданкового гібриду й сорго зерновому – 50 %, дещо нижчі в соризу – 47 % і найменші в сорго вінікового – 44 %.

Концентрація 30,0 мг/л була для рослин роду Сорго досить згубною і дозволила отримати життєздатних пагонів від 12 до 22 %. На контрольному варіанті було отримано 18 % життєздатних, у сорго-суданкового гібриду – 22 %, сориту та сорго зернового – 19 і 16 % а в сорго вінікового – 12 %.

Збільшення  $\text{CdCl}_2$  до 35,5 мг/л лише у сорго-суданкового гібриду та контрольному варіанті дозволило отримати 12 і 10 % життєздатних пагонів, а в досліджуваних варіантах – 5–8 % життєздатних пагонів.

Додавання в живильне середовище  $\text{CdSO}_4$  дозволяє відмітити, що кількість життєздатних пагонів була

Таблиця 1

**Вплив концентрації кадмію на життєздатність пагонів сорго на 3 добу культивування, %**

| Матеріал                          | Концентрація, мг/л |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                   | 10,0               | 15,0 | 20,0 | 25,0 | 30,0 | 35,0 | 40,0 | 45,0 |
| <b><math>\text{CdCl}_2</math></b> |                    |      |      |      |      |      |      |      |
| Контроль                          | 93                 | 87   | 54   | 31   | 18   | 10   | 8    | 2    |
| Сорго зернове                     | 90                 | 85   | 50   | 27   | 16   | 8    | 5    | 2    |
| Сорго вінікове                    | 82                 | 70   | 44   | 22   | 12   | 5    | 2    | -    |
| Сориз                             | 90                 | 83   | 47   | 25   | 19   | 7    | 4    | 3    |
| Сорго-суданковий гібрид           | 95                 | 85   | 50   | 27   | 22   | 12   | 5    | 3    |
| HIP <sub>05</sub>                 | 5                  | 4    | 2    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |
| <b><math>\text{CdSO}_4</math></b> |                    |      |      |      |      |      |      |      |
| Контроль                          | 97                 | 93   | 70   | 53   | 33   | 25   | 10   | 4    |
| Сорго зернове                     | 95                 | 90   | 67   | 55   | 27   | 20   | 8    | 4    |
| Сорго вінікове                    | 90                 | 80   | 64   | 43   | 20   | 12   | 7    | 2    |
| Сориз                             | 96                 | 95   | 65   | 58   | 25   | 17   | 10   | 5    |
| Сорго-суданковий гібрид           | 98                 | 95   | 77   | 65   | 29   | 25   | 12   | 6    |
| HIP <sub>05</sub>                 | 5                  | 4    | 2    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    |

вищою, ніж за введення  $\text{CdCl}_2$ . Дослідженнями встановлено, що за концентрації 10,0 мг/л  $\text{CdSO}_4$  відсоток життєздатних пагонів був від 90 до 98 %. Як і в дослідженнях із  $\text{CdCl}_2$  встановлено подібні закономірності. Зі збільшенням концентрації відбувається збільшення загибелі пагонів – найменша толерантність у сорго візикового, а найбільша – в сорго-суданкового гібриду.

Враховуючи попередні дані було зменшено та досліджено концентрації від 1,0 до 17,7 мг/л за культивування до 7 доби (табл. 2). Так, за найменшої концентрації 1,0 мг/л  $\text{CdCl}_2$  було отримано життєздатних пагонів від 95 до 100 %. Найвищі показники відповідно були у сорго-суданкового гібриду та контрольному варіанті – 100 %, сориз і сорго зернове формували 98 і 97 %, а сорго віникового 95 % пагонів.

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 віникового 5 %). Незначні зміни були за

додавання в середовище 2,5 і 5,0 мг/л  $\text{CdCl}_2$ , а життєздатність пагонів була високою – від 92 до 100 %.

Концентрація 7,5 мг/л сприяла утворенню некротичних пагонів і зниження життєздатності. Так, у варіантах ці показники були такі: сорго-суданковий гібрид – 94 і 5 %, контроль – 90 і 7 %, сориз – 92 і 5 %, зернове – 82 і 10 %, віникове – 74 і 17 %.

Введення 15,0 мг/л забезпечує отримання таких показників: сорго-суданковий гібрид – 70 %, контроль 68 %, сорго зернового і сориз – 65 %, і віникове – 60 %. Із них некротичних було від 18 до 33 % залежно від виду рослин.

Встановлено, що за додавання  $\text{CdSO}_4$  було отримано більшу кількість життєздатних пагонів та меншу кількість некротичних на усіх досліджуваних варіантах (табл. 3).

Додавання в середовище кадмію від 1,0 до 5,0 мг/л забезпечувала високий відсоток життєздатних пагонів – від 85 до 100 % з відсутністю некротичних клонів.

Таблиця 2

Формування життєздатних рослин сорго на 7 добу залежно від концентрації  $\text{CdCl}_2$ , %

| Матеріал                | концентрація, мг/л |     |     |     |      |      |      |      |
|-------------------------|--------------------|-----|-----|-----|------|------|------|------|
|                         | 1,0                | 2,5 | 5,0 | 7,5 | 10,0 | 12,5 | 15,0 | 17,5 |
| Життєздатні             |                    |     |     |     |      |      |      |      |
| Контроль                | 100                | 100 | 95  | 90  | 78   | 72   | 68   | 41   |
| Сорго зернове           | 97                 | 95  | 92  | 82  | 70   | 66   | 65   | 45   |
| Сорго віникового        | 95                 | 93  | 88  | 74  | 62   | 55   | 60   | 22   |
| Сориз                   | 98                 | 96  | 95  | 92  | 73   | 70   | 65   | 40   |
| Сорго-суданковий гібрид | 100                | 100 | 97  | 94  | 75   | 72   | 70   | 45   |
| HIP <sub>05</sub>       | 5                  | 4   | 2   | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    |
| Некротичні              |                    |     |     |     |      |      |      |      |
| Контроль                | -                  | -   | -   | 7   | 12   | 15   | 18   | 37   |
| Сорго зернове           | -                  | -   | -   | 10  | 20   | 25   | 29   | 42   |
| Сорго віникового        | -                  | -   | 5   | 17  | 27   | 30   | 33   | 50   |
| Сориз                   | -                  | -   | -   | 5   | 10   | 20   | 25   | 34   |
| Сорго-суданковий гібрид | -                  | -   | -   | 5   | 10   | 17   | 20   | 25   |
| HIP <sub>05</sub>       | -                  | -   | -   | 1   | 1    | 1    | 2    | 2    |

Таблиця 3

Формування життєздатності сорго на 7 добу залежно від концентрації  $\text{CdSO}_4$ , %

| 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 віникового        | 96                 | 90  | 85  | 80  | 90   | 71   | 53   | 32   |
| Сориз                   | 100                | 95  | 92  | 86  | 96   | 82   | 73   | 47   |
| Сорго-суданковий гібрид | 100                | 100 | 100 | 100 | 98   | 85   | 80   | 50   |
| HIP <sub>05</sub>       | 5                  | 4   | 2   | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    |
| Некротичні              |                    |     |     |     |      |      |      |      |
| Контроль                | -                  | -   | -   | 3   | 5    | 10   | 15   | 32   |
| Сорго зернове           | -                  | -   | -   | 3   | 10   | 13   | 18   | 41   |
| Сорго віникового        | -                  | -   | -   | 8   | 15   | 17   | 27   | 58   |
| Сориз                   | -                  | -   | -   | 8   | 5    | 10   | 12   | 35   |
| Сорго-суданковий гібрид | -                  | -   | -   | -   | 1    | 5    | 10   | 37   |
| HIP <sub>05</sub>       | -                  | -   | -   | 1   | 1    | 1    | 2    | 2    |

Некротичні пагони відмічені за введення 7,5 мг/л  $\text{CdSO}_4$ , хоча їх кількість була незначною від 3 до 8 %, а 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-суданкового гібриду було за цих концентрацій 98 і 85 %, соризу – 96 і 82 %, контрольному варіанті – 92 і 85 %, сорго зерновому – 94 і 80 % і сорго віникового – 90 і 71 %.

Важливим є кількість новоутворених пагонів, залежно від впливу та концентрації кадмію. Як видно із даних табл. 4 кількість пагонів була найвищою за додавання  $\text{CdSO}_4$ , ніж за  $\text{CdCl}_2$ . За концентрацій 20,0 і 25,0 мг/л не відзначено новоутворених клонів сорго в усіх варіантах. Дослідження концентрації 1,0 мг/л вказує, що кількість новоутворених пагонів незалежно від солі кадмію варіювала від 7 до 18 шт. Так, відмічено дещо нижчу кількість за  $\text{CdCl}_2$ , однак не істотно.

Концентрації 3,0 і 5,0 мг/л вказують, що за додаванні  $\text{CdCl}_2$  на контрольному варіанті кількість пагонів становила 13 і 12 шт., у сорго-суданкового гібриду – 15 і 13 шт., соризу – 16 і 13 шт., сорго зернового – 12 і 10 шт., сорго віникового – 6 і 5 шт.

Збільшення концентрацій 8,0 і 10,0 мг/л істотно зменшували у подальшому отримання нових пагонів в усіх досліджуваних матеріалах. Так, новоутворених пагонів відмічено в сорго зернового, контролі та соризу – 8 шт., у сорго-суданкового гібриду 12 і 10 шт., а найменше – в сорго віникового – 5 і 3 шт.

Досліджуючи вплив солей кадмію на висоту рослин можна відзначити, що вони пригнічували ріст пагонів (табл. 5). Так, за концентрації 1,0 мг/л і 3,0 мг/л на всіх варіантах не було відмічено істотного пригнічення. За додавання  $\text{CdCl}_2$  висота варіювала від 10 до 20 см, а за  $\text{CdSO}_4$  від 14 до 27 см. Вплив 5,0 мг/л дозволив отримати висоту від 8 до 15 см за  $\text{CdCl}_2$  та від 12 до 25 см.

Таблиця 4

**Кількість новоутворених пагонів 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 |
| $\text{CdCl}_2$         |                    |     |     |     |      |      |      |      |
| Контроль                | 15                 | 13  | 12  | 10  | 8    | 7    | 1    | -    |
| Сорго зернове           | 15                 | 12  | 10  | 8   | 8    | 6    | -    | -    |
| Сорго віникове          | 7                  | 6   | 5   | 5   | 3    | 2    | -    | -    |
| Сориз                   | 16                 | 13  | 10  | 10  | 8    | 5    | -    | -    |
| Сорго-суданковий гібрид | 17                 | 15  | 13  | 12  | 10   | 8    | 2    | -    |
| HIP <sub>05</sub>       | 1                  | 1   | 1   | 1   | 1    | 1    | 1    | -    |
| $\text{CdSO}_4$         |                    |     |     |     |      |      |      |      |
| Контроль                | 16                 | 14  | 12  | 10  | 10   | 9    | 1    | -    |
| Сорго зернове           | 12                 | 10  | 8   | 6   | 5    | 5    | 1    | -    |
| Сорго віникове          | 8                  | 7   | 6   | 5   | 5    | 3    | -    | -    |
| Сориз                   | 15                 | 13  | 10  | 10  | 8    | 7    | 1    | -    |
| Сорго-суданковий гібрид | 18                 | 16  | 13  | 10  | 10   | 8    | 2    | -    |
| HIP <sub>05</sub>       | 1                  | 1   | 1   | 1   | 1    | 1    | 1    | -    |

Таблиця 5

**Висота пагонів 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 |
| $\text{CdCl}_2$         |                    |     |     |     |      |      |      |      |
| Контроль                | 20                 | 17  | 15  | 12  | 10   | 8    | 6    | 3    |
| Сорго зернове           | 17                 | 14  | 12  | 10  | 8    | 6    | 4    | 3    |
| Сорго віникове          | 13                 | 10  | 8   | 7   | 6    | 5    | 3    | 3    |
| Сориз                   | 15                 | 12  | 10  | 10  | 8    | 7    | 5    | 3    |
| Сорго-суданковий гібрид | 22                 | 20  | 17  | 15  | 13   | 10   | 6    | 4    |
| HIP <sub>05</sub>       | 1                  | 1   | 1   | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    |
| $\text{CdSO}_4$         |                    |     |     |     |      |      |      |      |
| Контроль                | 22                 | 20  | 20  | 16  | 14   | 12   | 8    | 5    |
| Сорго зернове           | 24                 | 22  | 22  | 20  | 12   | 10   | 6    | 4    |
| Сорго віникове          | 16                 | 14  | 12  | 10  | 8    | 6    | 4    | 3    |
| Сориз                   | 25                 | 23  | 20  | 20  | 16   | 14   | 10   | 6    |
| Сорго-суданковий гібрид | 27                 | 25  | 25  | 23  | 20   | 16   | 12   | 8    |
| HIP <sub>05</sub>       | 1                  | 1   | 1   | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    |

Додавання 8,0 і 10,0 мг/л зменшувало висоту від 23 до 7 см. Вплив  $\text{CdCl}_2$  на досліджувані варіанти був більш пригнічувальним і на контрольному варіанті висота була 12 і 10 см, сорго-суданкового гібриду – 15 і 13 см, соризу та сорго зерновому – 10 і 8 см, сорго вініковому – 7 і 6 см. У середовищі із  $\text{CdSO}_4$  за досліджуваними концентраціями було встановлено такі показники: контроль – 16 і 14 см, сорго-суданковий гібрид – 23 і 20 см, сориз – 20 і 16 см, сорго зернове – 20 і 12 см і сорго вінікове – 10 і 8 см.

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

**Висновки.** Доведено, що пагони сорго вінікового мали найнижчу толерантність, а найвищу пагони сорго-суданкового гібриду незалежно від концентрацій солей кадмію та тривалості культивування. Встановлено, що на 3 добу культивування життєздатність пагонів варіювала від 82 до 95 % (10 мг/л) і від 70 до 87 % (15,0 мг/л), в подальшому їх життєздатність різко знижувалась. Проаналізовано, що некротичних пагонів не відмічено за концентрацій 1,0 і 2,5 мг/л і майже на 5,0 мг/л (лише у сорго вінікового 5 %). Збільшення концентрації до 17,5 мг/л призвело до значного збільшення некротичних і загиблених пагонів сорго. Оптимальною концентрацією є використання 10,0 і 15,0 мг/л.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Редько В. І., Недяк Т. М., Драгунова О. К. Вплив солей кадмію на рослини цукрових буряків у культурі in vitro. *Збірник наукових праць Інституту цукрових буряків УААН*. 2005. № 8. С. 425–429.
2. 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.
3. Мірюта Н. Ю. 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.
4. 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.
5. Рябовол Л. О., Любченко А. І., Єщенко О. В. Добір стійких до іонів  $\text{Ba}^{2+}$  клітинних ліній цикорію коренеплідного та програмування їх морфогенної активності. *Зб. наук. праць УДАУ «Основи формування продуктивності сільськогосподарських культур за інтенсивних технологій вирощування»*. Київ, 2008. С. 370–374.
6. Gonçalves J. F. et al. Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions. *Plant Physiology and Biochemistry*. 2009. Т. 47. № 9. С. 814–821.
7. Olabarrieta I. et al. In vitro effects of cadmium on two different animal cell models. *Toxicology in vitro*. 2001. Т. 15. № 4–5. С. 511–517.

8. Manquían-Cerda K. et al. 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. Т. 133. С. 316–326.
9. Wiszniewska A. et al. Comparative assessment of response to cadmium in heavy metal-tolerant shrubs cultured in vitro. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2017. Т. 228. С. 1–13.
10. Muszyńska E., Hanus-Fajerska E., Ciarkowska K. Studies on lead and cadmium toxicity in *Dianthus carthusianorum* calamine ecotype cultivated in vitro. *Plant Biology*. 2018. Т. 20. № 3. С. 474–482.
11. Leoni G. et al. Influence of cadmium exposure on in vitro ovine gamete dysfunction. *Reproductive toxicology*. 2002. Т. 16. № 4. С. 371–377.
12. Chen X. et al. Effects of cadmium on osteoblasts and osteoclasts in vitro. *Environmental Toxicology and Pharmacology*. 2009. Т. 28. № 2. С. 232–236.
13. Shekhawat G. S. et al. In vitro biochemical evaluation of cadmium tolerance mechanism in callus and seedlings of *Brassica juncea*. *Protoplasma*. 2010. Т. 239. С. 31–38.
14. 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. Т. 12. № 10. С. e0185621.
15. Soleimani S. H. et al. Cadmium accumulation and alkaloid production of *Narcissus tazetta* plants grown under in vitro condition with cadmium stress. *Plant Physiology Reports*. 2020. Т. 25. С. 51–57.
16. Fornazier R. F. et al. Cadmium stress in sugar cane callus cultures: effect on antioxidant enzymes. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. 2002. Т. 71. С. 125–131.
17. Xu J., Yin H. X., Li X. Protective effects of proline against cadmium toxicity in micropropagated hyperaccumulator, *Solanum nigrum* L. *Plant cell reports*. 2009. Т. 28. С. 325–333.
18. Рябовол Л. О. Клональне мікророзмноження рослин. Методичні рекомендації для проведення лабораторно-практичних занять з «Біотехнології рослин». Умань: УДАА, 2001. 16 с.
19. Us-Camas, R., Rivera-Solís, G., Duarte-Aké, F. et al. In vitro culture: an epigenetic challenge for plants. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 118, 2014. 187–201.
20. Войтовська В. І., Сторожик Л. І., Любич В. В., Третьякова С. О. Вегетативне розмноження сорго цукрового і зернового: метод. рек. Нац. акад. аграр. наук України, УНУС. Умань. 2019. С. 17.
21. Бабак В. П., Білецький А. Я., Приставка П. О., Приставка О. П. Статистична обробка даних: Монографія. Київ: МІВБЛ, 2001. 388 с.

#### REFERENCES:

1. Redko, V. I., Nediak, T. M., Drahunova, O. K. (2005). Vplyv solei kadmiiu na roslyny tsukrovykh buriakiv u kulturi in vitro [The effect of cadmium salts on sugar beet plants in in vitro culture]. *Zbirnyk naukovykh prats Instytutu tsukrovykh buriakiv UAAN*, no. 8, pp. 425–429. [in Ukrainian].
2. Shtapenko, O. V., Hevkan, I. I., Slyvchuk, Yu. I. (2018). Osoblyvosti tsytotoksichnoho vplyvu kadmii khloridu na klityny in vitro [Peculiarities of the cytotoxic effect of cadmium chloride on cells in vitro]. *Biologiya tvaryn*, no. 20, pp. 123–129. [in Ukrainian].

3. Miriuta, N. Yu. y dr. (2017). Roslyny Deschampsia antarctica E. Desv. z rıznykh chyslom khromosom v umovakh vyroshchuvannia in vitro. Ymovirnisni zvyazky trokh pokaznykiv prystosovuvannosti mizh soboiu ta z rozmirom henomu [Plants of Deschampsia antarctica E. Desv. with different numbers of chromosomes under in vitro cultivation conditions. Probabilistic relationships of three indicators of adaptability among themselves and with genome size]. Faktory eksperymentalnoi evoliutsii orhanizmiv, no. 20, pp. 293–298. [in Ukrainian].
4. Liubchenko, I. O., Riabovol, L. O., Liubchenko, A. I. (2016). Vykorystannia kultury in vitro v adaptivnii selektsii roslyn (ohliad literatury) [The use of in vitro culture in adaptive plant breeding (literature review)]. Zbirnyk naukovykh prats Umanskoho natsionalnoho universytetu sadivnytstva, no. 88 (1), pp. 126–139. [in Ukrainian].
5. Riabovol, L. O., Liubchenko, A. I., Yeshchenko, O. V. (2008). Dobir stiikyk do ioniv  $Va^{2+}$  klitynnnykh liniy tsykoriu koreneplidnoho ta prohramuvannia yikh morfohennoi aktivnosti [Selection of  $Ba^{2+}$ -resistant cell lines of chicory root and programming their morphogenic activity]. Zb. nauk. prats UDAU «Osnovy formuvannia produktyvnosti silskohospodarskykh kultur za intensyvnykh tekhnolohii vyroshchuvannia», Kyiv, pp. 370–374. [in Ukrainian].
6. Gonçalves, J. F. et al. (2009). Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions. Plant Physiology and Biochemistry. no. 47, pp. 814–821.
7. Olabarrieta, I. et al. (2001). In vitro effects of cadmium on two different animal cell models. Toxicology in vitro. no. 15, pp. 511–517.
8. Manquian-Cerda, K. et al. (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. no. 133, pp. 316–326.
9. Wiszniewska, A. et al. (2017). Comparative assessment of response to cadmium in heavy metal-tolerant shrubs cultured in vitro. Water, Air, & Soil Pollution. no. 228, pp. 1–13.
10. Muszyńska, E., Hanus-Fajerska, E., Ciarkowska, K. (2018). Studies on lead and cadmium toxicity in Dianthus carthusianorum calamine ecotype cultivated in vitro. Plant Biology. no. 20, pp. 474–482.
11. Leoni, G. et al. (2002). Influence of cadmium exposure on in vitro ovine gamete dysfunction. Reproductive toxicology. no. 16, pp. 371–377.
12. Chen, X. et al. (2009). Effects of cadmium on osteoblasts and osteoclasts in vitro. Environmental Toxicology and Pharmacology. no. 28, pp. 232–236.
13. Shekhawat, G. S. et al. (2010). In vitro biochemical evaluation of cadmium tolerance mechanism in callus and seedlings of Brassica juncea. Protoplasma. no. 239, pp. 31–38.
14. 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. no. 12, e0185621.
15. Soleimani, S. H. et al. (2020). Cadmium accumulation and alkaloid production of Narcissus tazetta plants grown under in vitro condition with cadmium stress. Plant Physiology Reports. no. 25, pp. 51–57.
16. Fornazier, R. F. et al. (2002). Cadmium stress in sugar cane callus cultures: effect on antioxidant enzymes. Plant Cell, Tissue and Organ Culture. no. 71, pp. 125–131.
17. Xu, J., Yin, H. X., Li, X. (2009). Protective effects of proline against cadmium toxicity in micropropagated hyperaccumulator, Solanum nigrum L. Plant cell reports. no. 28, pp. 325–333.
18. Riabovol, L. O. (2001). Klonalne mikroroznozhennia roslyn [Clonal micropropagation of plants]. Methodological recommendations for laboratory and practical classes on «Plant biotechnology». Uman: UDAA, 16 p. [in Ukrainian].
19. Us-Camas, R., Rivera-Solis, G., Duarte-Aké, F. et al. (2014). In vitro culture: an epigenetic challenge for plants. Plant Cell Tiss Organ Cult, no. 118, pp. 187–201. (in English).
20. Voitovska, V. I., Storozhyk, L. I., Liubych, V. V., Tretiakova, S. O. (2019). Vehoatyvne rozmnozhennia sorho tsukrovoho i zernovoho: metod. rek. Nats. akad. ahrar. nauk Ukrainy [Vegetative propagation of sugar and grain sorghum: method. rec. National Acad. of Agrarian Sciences of Ukraine], UNUS. Uman. 17 p. [in Ukrainian].
21. Babak, V. P., Biletskyi, A. Ia., Prystavka, P. O., Prystavka, O. P. (2001). Statystychna obrobka danykh: Monohrafiia [Statistical data processing]. Kyiv: MIVVC, 388 p. [in Ukrainian].

**Любич В.В., Войтовська В.І. Вплив солей кадмію на ріст і розвиток рослин роду сорго у культурі *in vitro***

**Мета.** Дослідити вплив різних концентрацій солей кадмію на ріст і розвиток пагонів роду Соргових в умовах *in vitro* та провести добір толерантних форм при створенні стійкого до абіотичних чинників вихідного матеріалу. **Методи.** Лабораторний, біотехнологічний, вимірювальний, розрахунково-порівняльний, аналізування, статистичний. **Результати.** Встановлено, що пагони сорго незалежно від концентрацій солей кадмію найбільш чутливі були у сорго вінікового, а найстійкіші у сорго-суданкового гібриду. Дослідження вказують, що за концентрацій  $CdCl_2$  10,0 мг/л було отримано на 3 добу культивування від 82 до 95 % пагонів. На контрольному варіанті життєздатні пагони становили 93 %, у сорго-суданкового гібриду 95 %, сориту та сорго зернового – 90 % і найменше у сорго вінікового – 82 %. Із збільшенням концентрації до 15,0 мг/л у досліджуваних зразків було отримано від 70 до 87 %. Найвищі показники відмічено на контролі (87 %), сорго-суданкового гібриду та сорго зернового (85 %), а найменші – в сорго вінікового (70 %). Концентрація 20,0 мг/л була більш токсичнішою та на всіх варіантах відзначено від 44 до 54 % некротичних пагонів. Як і в попередніх дослідженнях найвищі показники були на контролі – 54 % та сорго-суданкового гібриду й сорго зерновому – 50 %, дещо нижчі в соризу – 47 % і найменші в сорго вінікового – 44 %. **Висновки.** Доведено, що пагони сорго вінікового мали найнижчу толерантність, а найвищу пагони сорго-суданкового гібриду незалежно від концентрацій солей кадмію та тривалості культивування. Встановлено, що на 3 добу культивування життєздатність пагонів варіювала від 82 до 95 % (10 мг/л) і від 70 до 87 % (15,0 мг/л), в подальшому їх життєздатність різко знижувалась. Проаналізовано, що некротичних пагонів не відмічено

за концентрацій 1,0 і 2,5 мг/л і майже на 5,0 мг/л (лише у сорго віникового 5 %). Збільшення концентрації до 17,5 мг/л призвело до значного збільшення некротичних і загиблих пагонів сорго. Оптимальною концентрацією є використання 10,0 і 15,0 мг/л.

**Ключові слова:** іони металів, солі кадмію, життєздатні проростки, некротичні плями, живильне середовище.

**Liubych V.V., Voitovska V.I. Effect of cadmium salts on the growth and development of Sorghum plants in vitro**

**Aims.** To investigate the effect of different concentrations of cadmium salts on the growth and development of shoots of the Sorghum genus under in vitro conditions and to select tolerant forms when creating a starting material resistant to abiotic factors. **Methods.** Laboratory, biotechnological, measuring, calculation and comparison, analysis, statistical. **Results.** It was established that Sorghum shoots, regardless of the concentrations of cadmium salts, were most sensitive in broom Sorghum, and most resistant in the Sorghum sudanese hybrid. Studies indicate that at  $\text{CdCl}_2$  concentrations of 10.0 mg/l, 82 to 95 % of shoots were obtained on the third day of cultivation. In the control variant, viable shoots were 93 %, in the Sorghum sudanese hybrid 95 %, in sorites and grain Sorghum – 90 %, and the least in broom Sorghum – 82 %. With an increase in concentration up to 15.0 mg/l, 70 to 87 % of the studied samples were obtained. The highest indicators

were observed in the control (87 %), Sorghum sudanese hybrid and grain Sorghum (85 %), and the lowest in broom Sorghum (70 %). The concentration of 20.0 mg/l was more toxic and 44 to 54 % of necrotic shoots were noted on all variants. As in previous studies, the highest rates were in the control – 54 % and in the Sorghum sudanese hybrid and grain Sorghum – 50 %, slightly lower in soriz – 47 % and the lowest in broom sorghum – 44 %. **Conclusions.** It was proven that shoots of broom Sorghum had the lowest tolerance, and shoots of the Sorghum sudanese hybrid had the highest, regardless of the concentrations of cadmium salts and cultivation period. It was established that on the third day of cultivation, the viability of the shoots varied from 82 to 95 % (10 mg/l) and from 70 to 87 % (15.0 mg/l), and subsequently their viability sharply decreased. It was analyzed that necrotic shoots were not observed at concentrations of 1.0 and 2.5 mg/l and almost at 5.0 mg/l (only in 5 % broom Sorghum). Increasing the concentration to 17.5 mg/l resulted in a significant increase in necrotic and dead Sorghum shoots. The optimal concentration is to use 10.0 and 15.0 mg/l.

**Key words:** metal ions, cadmium salts, viable seedlings, necrotic spots, nutrient medium.

Дата першого надходження рукопису до видання: 26.09.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 27.10.2025

Дата публікації: 28.11.2025