

УДК 633.522:581.192:632.95

DOI <https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.149.2.5>

## АНТИОКСИДАНТНИЙ ЗАХИСТ *CANNABIS SATIVA L.* ВІД ТОКСИЧНОЇ ДІЇ ХІМІЧНИХ ГАМЕТОЦИДІВ

**Мищенко С.В.** – д.с.-г.н.,

доцент кафедри біології, здоров'я людини та методики навчання,  
Глухівський національний педагогічний університет імені Олександра Довженка,  
головний науковий співробітник відділу селекції і насінництва конопель,  
Інститут луб'яних культур Національної академії аграрних наук України  
[orcid.org/0000-0002-1979-4002](https://orcid.org/0000-0002-1979-4002)

**Кириченко Г.І.** – к.с.-г.н.,

старший науковий співробітник відділу селекції і насінництва конопель,  
Інститут луб'яних культур Національної академії аграрних наук України  
[orcid.org/0000-0003-3609-3141](https://orcid.org/0000-0003-3609-3141)

**Лавриненко Ю.О.** – д.с.-г.н., професор,

академік Національної академії аграрних наук України,  
головний науковий співробітник відділу селекції сільськогосподарських культур,  
Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства  
Національної академії аграрних наук України  
[orcid.org/0000-0001-9442-8793](https://orcid.org/0000-0001-9442-8793)

**Марченко Т.Ю.** – д.с.-г.н., професор,

завідувачка відділу селекції сільськогосподарських культур,  
Інститут кліматично орієнтованого сільського господарства  
Національної академії аграрних наук України  
[orcid.org/0000-0001-6994-3443](https://orcid.org/0000-0001-6994-3443)

Подано результати комплексного дослідження щодо нівелювання фітотоксичного впливу хімічних гаметоцидів (1,3-дибромпропан, дибутилфталат, 2-хлоретилфосфонова кислота) на рослини конопель посівних (*Cannabis sativa L.*) однодомної форми за допомогою екзогенного застосування антиоксидантів – аскорбінової кислоти та калій метасилікату. Актуальність роботи зумовлена необхідністю стабілізації селекційного процесу і отримання гібридного насіння, який часто супроводжується пригніченням материнських рослин під дією стерилізуючих агентів, що негативно впливає на насіннєву продуктивність та частку виживших рослин. Методологічне значення дослідження полягає в обґрунтуванні концепції фізіологічного демпфування побічної дії хімічних агентів за допомогою синергічної комбінації аскорбінової кислоти й іонної форми Силіцію (Si). Загальнонаукова цінність роботи визначається розробкою стабільної селекційної технології, що дозволяє нівелювати мультифакторний стрес і підвищувати насіннєву продуктивність конопель посівних. Це забезпечує перехід від емпіричного застосування гаметоцидів до керованого процесу збереження життєздатності та генетичного потенціалу материнських ліній. Застосування аскорбінової кислоти та сполук Si між обробками хімічними гаметоцидами сприяло зменшенню їх пригнічувальної дії, що проявилось у підвищенні кількості сформованого насіння на материнських рослинах на 17–21% та збільшенні виходу гібридних рослин у фазу біологічної стиглості на 5–11%. Їхня дія спрямована на захист генеративної сфери рослин конопель та підтримку загального метаболізму в стресових умовах. Використані антиоксиданти не впливали на стабільність однодомності, відсутність тетрагідроканабінолу та співвідношення непсихотропних канабіноїдів, що підтверджує безпечність їх



© Мищенко С.В., Кириченко Г.І., Лавриненко Ю.О., Марченко Т.Ю., 2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

застосування з точки зору збереження генетичних характеристик вихідного селекційного матеріалу. Рекомендовано включення антиоксидантних обробок у технологічні карти вирощування насінневих та волокнистих сортів конопель, особливо в зонах ризикованого землеробства з частими проявами абіотичних стресів.

**Ключові слова:** коноплі, схрещування, гібрид, насіннева продуктивність, хімічні гаметоциди, антиоксиданти, оксидативний стрес.

**Mishchenko S.V., Kyrychenko H.I., Lavrynenko Yu.O., Marchenko T.Yu. Antioxidant protection of *Cannabis sativa* L. against the toxic effects of chemical gametocides**

This paper presents the results of a comprehensive study on mitigating the phytotoxic effects of chemical gametocides (1,3-dibromopropane, dibutyl phthalate, 2-chloroethylphosphonic acid) on monoecious *Cannabis sativa* L. plants through the exogenous application of antioxidants – ascorbic acid and potassium metasilicate. The relevance of this work stems from the need to stabilize the breeding process and obtain hybrid seeds, a process often accompanied by the suppression of maternal plants under the influence of sterilizing agents, which negatively affects seed productivity and the proportion of surviving plants. The methodological significance of the study lies in substantiating the concept of physiological buffering of the side effects of chemical agents through a synergistic combination of ascorbic acid and the ionic form of silicon (Si). The general scientific value of the work lies in the development of a stable breeding technology that allows for the mitigation of multifactorial stress and the enhancement of seed productivity in cultivated hemp. This facilitates a transition from the empirical use of gametocides to a controlled process for preserving the viability and genetic potential of maternal lines. The application of ascorbic acid and Si compounds between treatments with chemical gametocides helped reduce their inhibitory effect, as evidenced by a 17–21% increase in the number of seeds formed on maternal plants and a 5–11% increase in the yield of hybrid plants reaching the biological maturity phase. Their action is aimed at protecting the reproductive system of hemp plants and supporting overall metabolism under stressful conditions. The antioxidants used did not affect the stability of monoeciousness, the absence of tetrahydrocannabinol, or the ratio of non-psychoactive cannabinoids, confirming the safety of their use in terms of preserving the genetic characteristics of the original breeding material. It is recommended to include antioxidant treatments in the cultivation protocols for seed and fiber hemp varieties, especially in high-risk agricultural areas with frequent occurrences of abiotic stress.

**Key words:** hemp, crossbreeding, hybrid, seed productivity, chemical gametocides, antioxidants, oxidative stress.

**Постановка проблеми.** Впровадження гібридних сортів культурних рослин дозволило вражаюче збільшити їх продуктивність завдяки ефекту гетерозису та підвищеній однорідності. Для виробництва гібридного насіння необхідна система контролю запилення, щоб запобігти небажаному самозапиленню. У агрокультур з гермафродитними квітками це може бути серйозною проблемою, тому для стратегічно важливих видів були розроблені системи отримання гібридів на основі цитоплазматичної чоловічої стерильності, або ж за допомогою генної інженерії впроваджені нові системи контролю запилення, головним чином засновані на генерації чоловічої стерильності, закодованої в ядрі [1]. Успішне застосування цих систем для великомасштабного виробництва гібридного насіння залежить від того, чи можна ефективно та економічно розмножувати батьківські лінії зі стерильними чоловічими квітками [1], тому часто використовують хімічні стерилізатори – гаметоциди.

Гаметоциди широко застосовуються у селекції рослин для індукції чоловічої стерильності та отримання гібридного насіння. Використання цих сполук дозволяє значно спростити технологію отримання гібридів, оскільки усуває необхідність ручного видалення пиляків. Проте, застосування гаметоцидів часто супроводжується побічними фітотоксичними ефектами, схожими на дію гербіцидів, що проявляються у пригніченні ростових процесів, порушенні фотосинтетичної активності, пошкодженні репродуктивних органів рослин та ін. [2]. Таким чином, виникає необхідність подолання таких негативних ефектів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Хоча чоловіча стерильність, індукована хімічними агентами, є важливим етапом схрещування у багатьох культурних рослин, механізми, за допомогою яких ці агенти викликають чоловічу стерильність, недостатньо вивчені. Протеомні та транскриптомні дослідження, проведені з пшеницею, підтверджують, що дія гаметоцидів супроводжується значними змінами у генетичному апараті рослин – експресії генів і білків, пов'язаних із метаболізмом енергії, антиоксидантною системою та регуляцією клітинної смерті [3, 4]. Такі зміни свідчать про те, що оксидативний стрес є одним із центральних механізмів формування стерильності під дією хімічних стерилізаторів.

Доведено, що під впливом хімічних агентів, таких як супероксид-аніон та гідроген перекис, у рослин різко зростає утворення активних форм Оксигену ( $O_2$  і  $H_2O_2$ ) [2, 5]. Надмірне накопичення цих сполук призводить до перекисного окиснення ліпідів клітинних мембран, що супроводжується змінами активності антиоксидантних ферментів – супероксиддисмутази, каталази та пероксидаз. Такі зміни призводять до порушення окисно-відновного балансу клітин та посилення оксидативного стресу, тобто порушення метаболічних процесів і активації програмованої клітинної смерті – апоптозу [5, 6].

Важливу роль у механізмі дії гаметоцидів відіграє також порушення функціонування мітохондрій. Дослідження показали, що обробка рослин окремими гаметоцидами спричиняє пригнічення активності білків електронтранспортного ланцюга мітохондрій, що призводить до зниження синтезу АТФ і посилення утворення активних форм Оксигену [6]. У результаті відбувається передчасна деградація клітин тапетума – тканини пиляка, яка забезпечує живлення мікроспор. Порушення функціонування тапетума призводить до абортивності пилку та формування чоловічої стерильності [7].

У зв'язку з вищевикладеним, значний інтерес викликає використання антиоксидантів для зменшення негативного впливу гаметоцидів. Антиоксиданти здатні нейтралізувати активні форми Оксигену та стабілізувати клітинні мембрани, що сприяє зниженню рівня оксидативного стресу в рослинних тканинах.

Одним із найважливіших неферментативних антиоксидантів у рослин є аскорбінова кислота (вітамін С). Вона відіграє ключову роль у функціонуванні аскорбат-глутатіонового циклу, який забезпечує детоксикацію активних форм Оксигену та підтримання клітинного гомеостазу [8]. Аскорбінова кислота бере участь у регуляції ростових процесів, фотосинтезу та захисту клітин від пошкодження при дії різних абіотичних стресів.

Дослідження показали, що підвищення рівня аскорбінової кислоти у клітинах рослин сприяє зниженню рівня перекисного окиснення ліпідів і підвищенню активності антиоксидантних ферментів. Це дозволяє значно зменшити пошкодження клітин під впливом різних токсичних речовин, включаючи гербіциди та інші хімічні агенти [8]. Можна припустити, що застосування аскорбінової кислоти екзогенного походження може сприяти послабленню негативного впливу гаметоцидів на рослини [9].

Іншим важливим фактором підвищення стійкості рослин до хімічних стресів є Силіцій (Si). Встановлено, що цей елемент відіграє важливу роль у формуванні стійкості рослин до різних абіотичних і біотичних чинників. Si здатний посилювати антиоксидантний захист клітин, підвищувати активність ферментів антиоксидантної системи та знижувати рівень накопичення активних форм кисню [10].

За даними численних досліджень, обробка рослин Si сприяє підвищенню активності супероксиддисмутази, каталази та пероксидаз, що забезпечує ефективніший

захист клітин від оксидативного стресу [10]. Крім того, Si може зміцнювати клітинні стінки, стабілізувати мембранні структури та регулювати водний баланс рослин, може регулювати рівні ендогенних рослинних гормонів в умовах стресу.

У роботах, присвячених фізіологічній ролі Si, показано, що цей елемент здатний значно зменшувати негативний вплив різних токсичних факторів, включаючи важкі метали, засолення та дію хімічних речовин [10, 11]. Завдяки цьому Si розглядається як перспективний компонент агротехнологій, спрямованих на підвищення стійкості культурних рослин до стресових чинників.

В процесі гібридизації конопель посівних (*Cannabis sativa* L.) можливе успішне застосування гаметоцидів, однак воно спричиняє зменшення показників ознак загальної і технічної довжини, діаметру стебла, маси стебла і волокна, вмісту волокна, маси насіння і тисячі насінин, частина рослин гине до настання фази біологічної стиглості. Зі збільшенням концентрації того чи іншого препарату рівень прояву цінних господарських (селекційних) ознак зменшуються, а за обробки на більш пізніх етапах онтогенезу – фактично залишається без змін, хоча в останньому випадку зменшується частота прояву чоловічої стерильності [12]. У зв'язку з цим виникає проблема зменшення негативного впливу стерилізуючих хімічних речовин на коноплі. Можна припустити, що використання антиоксидантів, зокрема аскорбінової кислоти, а також застосування Si, як регулятора антиоксидантної системи, може зменшувати негативні наслідки дії гаметоцидів та підвищувати стійкість рослин до хімічного стресу.

**Мета досліджень** – встановити можливості антиоксидантів (аскорбінової кислоти та іонної форми Si) для зменшення негативного впливу гаметоцидів на коноплі посівні.

Методологічне значення дослідження полягає в обґрунтуванні концепції фізіологічного демпфування побічної дії хімічних агентів за допомогою синергічної комбінації іонного Si та аскорбінової кислоти. Загальнонаукова цінність роботи визначається розробкою стабільної селекційної технології, що дозволяє нівелювати мультифакторний стрес і підвищувати насінневу продуктивність *Cannabis sativa* L. Це забезпечує перехід від емпіричного застосування гаметоцидів до керованого процесу збереження життєздатності та генетичного потенціалу материнських ліній.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Дослідження проводили на базі Інституту луб'яних культур НААН у 2024–2025 рр. У ролі гаметоцидів застосовували такі сполуки: 1,3-дибромпропан ( $C_3H_6Br_2$ ), дибутилфталат ( $C_6H_4(CO_2C_4H_9)_2$ ) і 2-хлоретилфосфонова кислота ( $ClCH_2CH_2P(O)(OH)_2$ ). Обробку рослин конопель однодомної материнської форми (17 варіантів схрещувань) здійснювали вранці у суху безвітряну погоду у фази: ВВСН 15, ВВСН 51 і ВВСН 65 [13]. Застосовували водні розчини з концентрацією 2,0% 1,3-дибромпропану, 2,0% дибутилфталату і 0,3% 2-хлоретилфосфонові кислоти. Доза робочого розчину – 30 мл / 1м<sup>2</sup>. Дибутилфталат майже не розчинний у воді, тому рідини перед обприскуванням інтенсивно струшували, отримуючи емульсію. Контрольний варіант – обробка дистильованою водою. Через кожні 7 діб після застосування гаметоцидів проводили обробку рослин водним розчином речовин з антиоксидантними властивостями: після першого – аскорбінової кислоти ( $C_6H_8O_6$ , 0,4 г/л), після другого – калій метасилікатом ( $K_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ , 5,0 г/л), після третього – повторно аскорбіновою кислотою, у фазу ВВСН 67-71 – знову калій метасилікатом. Неоднорідні погоднокліматичні умови років досліджень дозволили всебічно і об'єктивно оцінити досліджувані варіанти. Зменшення токсичної (негативної) дії гаметоцидів внаслідок

застосування антиоксидантів визначали за зміною ознак маси гібридного насіння з рослини та за кількістю отриманих рослин у фазу біологічної стиглості.

Усереднені експериментальні дані ілюструють відгук 17 генетично гетерогенних зразків конопель (окремі сім'ї та популяції сортів, самозапилени лінії, а також конвергентні міжсортів та лінійно-сортів гібриди першого покоління, споріднені за батьківською формою та напрямками господарського використання – насінним і волокнистим) на застосування аскорбінової кислоти та калій метасилікату на фоні стресової дії гаметоцидів: 1,3-дибромпропан, дибутілфталат, 2-хлоретилфосфонові кислота і свідчать про стабільне зростання маси насіння з високим діапазоном ефективності в усіх варіантах дослідження порівняно з контрольними ділянками, де антиоксиданти не застосовувалися (рис. 1).

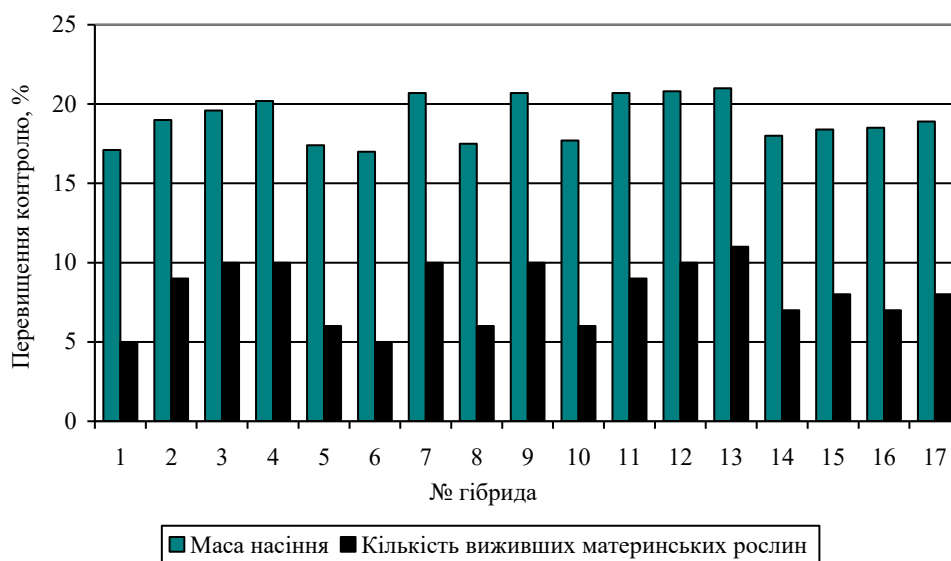


Рис. 1. Зменшення пригнічувальної дії гаметоцидів під впливом обробки антиоксидантами

Примітка: 1 – ЮСО 31 / Миколайчик, 2 –  $F_1$  ЮСО 31 / Афіна // Миколайчик, 3 – Афіна (d-302 p-587) / Миколайчик, 4 – Афіна (d-303 p-592) / Миколайчик, 5 – Деметра / Миколайчик, 6 –  $F_1$  Деметра / Афіна // Миколайчик, 7 – Гармонія / Миколайчик, 8 –  $F_1$  Гармонія / Афіна // Миколайчик, 9 – Артеміда / Миколайчик, 10 –  $F_1$  Артеміда / Афіна // Миколайчик, 11 –  $F_1$  Афродіта / Афіна // Миколайчик, 12 – Глесія / Миколайчик, 13 –  $F_1$  Глесія / Афіна // Миколайчик, 14 –  $F_1 I_3$  Глухівські 33 / Афіна // Миколайчик, 15 – Глухівські 51 (популяція 1) / Миколайчик, 16 – Глухівські 51 (популяція 2) / Миколайчик, 17 –  $F_1$  Глухівські 51 / Афіна // Миколайчик

Перевищення контролю за масою насіння коливалося в межах 17,1–21,2%. Це підтверджує гіпотезу про те, що екзогенні антиоксиданти ефективно нівелюють оксидативний стрес у тканинах гінцею, спричинений агресивними хімічними агентами. Найвищі показники (понад 20,5%) продемонстрували гібриди  $F_1$  Гармонія / Миколайчик, Артеміда / Миколайчик, Глесія / Миколайчик і Глесія / Афіна // Миколайчик. Особливо примітним є останній, де зафіксовано максимальний приріст маси насіння – 21,1%. Це свідчить про високу пластичність гібридів на основі

сорту Глесія до дії антиоксидантних сполук. Гібриди F<sub>1</sub> ЮСО 31 / Миколайчик, Деметра / Миколайчик і Деметра / Афіна // Миколайчик показали дещо нижчий, але статистично доведений приріст (17,1–17,4%), що може бути зумовлено специфікою метаболізму конкретних самозапилених ліній.

Показник збільшення частки виживаності гібридних рослин у більшості комбінацій схрещування (зокрема №№ 2, 3, 4, 7, 8, 9, 11, 12) знаходився на рівні 9,2–10,2%. Це вказує на те, що антиоксидантна обробка материнських рослин закладає кращий адаптивний потенціал до пригнічувальної дії гаметоцидів.

Окрім того, спостерігалася пряма залежність (кореляція) між масою насіння та виживаністю рослин. Варіант схрещування Глесія / Афіна // Миколайчик знову став лідером за показником перевищення контролю (на 11,2%). Варіанти схрещування ЮСО 31 / Миколайчик, Деметра / Миколайчик і Деметра / Афіна // Миколайчик продемонстрували збільшення частки виживших рослин на рівні 5,1–5,2%, що корелює з їхніми нижчими показниками маси насіння, тобто аскорбінова кислота і калій метасилікат впливали на сукупність ознак рослин конопель. Це підтверджує, що певні генотипи потребують індивідуального підбору антиоксидантів чи їх концентрацій.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Застосування аскорбінової кислоти та сполук Si між обробками хімічними гаметоцидами сприяло зменшенню їх пригнічувальної дії, що проявилось у підвищенні кількості сформованого насіння на материнських рослинах на 17–21% та збільшенні виходу гібридних рослин у фазу біологічної стиглості на 5–11%. Їхня дія спрямована на захист генеративної сфери рослин конопель та підтримку загального метаболізму в стресових умовах. Використані антиоксиданти не впливали на рівень прояву чоловічої стерильності, стабільність однодомності, відсутність тетрагідроканабінолу та співвідношення непсихотропних канабіноїдів, що підтверджує безпечність їх застосування з точки зору збереження генетичних характеристик вихідного селекційного матеріалу. Рекомендовано включення антиоксидантних обробок у технологічні карти вирощування насіннєвих та волокнистих сортів конопель, особливо в зонах ризикованого землеробства з частими проявами абіотичних стресів.

Подальші дослідження у цьому напрямі будуть спрямовані на оптимізацію режимів застосування антиоксидантів з метою підвищення ефективності використання гаметоцидів у селекційній практиці.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Pérez-Prat E., van Lookeren Campagne M. M. Hybrid seed production and the challenge of propagating male-sterile plants. *Trends in Plant Science*. 2002. Vol. 7, Iss. 5. P. 199–203. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02252-5](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02252-5)
2. Wang S., Zhang G., Song Q., Zhang Y., Li Y., Guo J., Chen Z., Niu N., Ma S., Wang J. Programmed cell death, antioxidant response and oxidative stress in wheat flag leaves induced by chemical hybridization agent SQ-1. *Journal of Integrative Agriculture*. 2016. Vol. 15, Iss. 1. P. 76–86. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60977-1](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60977-1)
3. Liu H., Zhang G., Wang J., Li J., Song Y., Qiao L., Niu N., Wang J., Ma S., Li L. Chemical hybridizing agent SQ-1-induced male sterility in *Triticum aestivum* L.: Comparative analysis of the anther proteome. *BMC Plant Biology*. 2018. Vol. 18. Article 7. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12870-017-1225-x>
4. Zhu Q., Song Y., Zhang G., Ju L., Zhang J., Yu Y., Niu N., Wang J., Ma S. De novo assembly and transcriptome analysis of wheat with male sterility induced by the chemical hybridizing agent SQ-1. *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10, Iss. 3. Article e0123556. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123556>

5. Wang S., Zhang Y., Song Q., Fang Z., Chen Z., Zhang Y., Zhang L., Niu N., Ma S., Wang J. Mitochondrial dysfunction causes oxidative stress and tapetal apoptosis in chemical hybridization reagent-induced male sterility in wheat. *Frontiers in Plant Science*. 2018. Vol. 8. Article 2217. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02217>
6. Song Y., Zhang G., Guo J., Niu N., Wang J., Ma S. Comparative proteomic analysis of a membrane-enriched fraction from flag leaves reveals responses to chemical hybridization agent SQ-1 in wheat. *Frontiers in Plant Science*. 2015. Vol. 6. Article 669. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00669>
7. Wang S., Zhang G., Song Q., Zhang Y., Li Z., Guo J., Niu N., Ma S., Wang J. Abnormal development of tapetum and microspores induced by chemical hybridization agent SQ-1 in wheat. *PLoS ONE*. 2015. Vol. 10, Iss. 3. Article e0119557. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0119557>
8. Smirnov N. Ascorbic acid metabolism and functions: A comparison of plants and mammals. *Free Radical Biology and Medicine*. 2018. Vol. 122. P. 116–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2018.03.033>
9. Міщенко С. В. Вплив аскорбінової кислоти екзогенного походження на *Cannabis sativa* L. в умовах *in vitro* та *in vivo*. *Вісник Центру наукового забезпечення АПВ Харківської області*. 2019. Вип. 26. С. 67–74.
10. Zhu Y., Gong H. Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*. 2014. Vol. 34. P. 455–472. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0194-1>
11. Adrees M., Ali S., Rizwan M., Zia-Ur-Rehman M., Ibrahim M., Abbas F., Farid M., Qayyum M. F., Irshad M. K. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 2015. Vol. 119. P. 186–197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.05.011>
12. Міщенко С. В., Лайко І. М. Вплив гаметоцидів на формування чоловічої стерильності та селекційних ознак однодомних конопель. *Селекція і насінництво*. 2017. Вип. 111. С. 88–97. DOI: <https://doi.org/10.30835/2413-7510.2017.104890>
13. Mishchenko S., Mokher J., Laiko I., Burbulis N., Kyrychenko H., Dudukova S. Phenological growth stages of hemp (*Cannabis sativa* L.): codification and description according to the BBCH scale. *Žemės ūkio mokslai*. 2017. T. 24. Nr. 2. P. 31–36. DOI: <https://doi.org/10.6001/zemesukiomokslai.v24i2.3496>

Дата першого надходження статті до видання: 02.04.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 22.05.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 29.05.2026