

УДК.581.143.01/07:577.125

В. Стороженко, канд. біол. наук, Н. Светлова, канд. біол. наук, М. Коваленко, асп.,
Л. Бацманова, канд. біол. наук, Н. Таран, д-р біол. наук, проф.
ННЦ "Інститут біології та медицини",
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ІНДУКЦІЯ СТІЙКОСТІ ПРОРОСТКІВ ПШЕНИЦІ ДО ДІЇ МОДЕЛЬОВАНОЇ ПОСУХИ КОЛОЇДНИМ РОЗЧИНОМ НАНОЧАСТИНОК Cu^{2+} І Zn^{2+}

Досліджено вплив колоїдного розчину наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} на про/антиоксидантний баланс, вміст фотосинтетичних пігментів (хлорофілів а, b і каротиноїдів), співвідношення хлорофілів та морфометричні показники (відносний вміст води в листках, площа листової поверхні) проростків озимої пшениці *Triticum aestivum* L. сортів Акведук (степовий екотип, стійкий до посухи) та Столична (лісостеповий екотип, чутливий до посухи) в умовах модельованої посухи. Посуху створювали шляхом припинення поливу на 8 добу після появи сходів та підтримання вологості ґрунту на рівні 30 % від повної вологоємності протягом 3 діб. Передпосівну обробку насіння наночастинками Cu^{2+} і Zn^{2+} виконували шляхом замочування в дослідному розчині (1 частина маточного колоїдного розчину : 100 частин води) протягом 4 годин. Контрольний варіант замочували в дистильованій воді. Потім насіння відмивали та висаджували в піщану культуру. Виявлено сортову специфічність впливу колоїдного розчину наночастинок металів на проростки сортів Акведук і Столична. Передпосівна обробка насіння наночастинками Cu^{2+} і Zn^{2+} призводила до істотних змін про/антиоксидантного балансу в листках проростків, які полягали у зниженні рівня накопичення ТБК-активних продуктів, підвищенні активності ключових антиоксидантних ферментів (супероксиддисмутази та каталази), стабілізації вмісту фотосинтетичних пігментів, збільшенні відносного вмісту води в листках і площі листової поверхні за умов модельованої посухи.

Загалом за умов посухи передпосівна обробка насіння колоїдним розчином наночастинок спричиняла позитивний вплив на про/антиоксидантний баланс рослин і морфометричні параметри листків більшою мірою у проростків сорту степового екотипу (Акведук) і меншою – у проростків сорту лісостепового екотипу (Столична).

Ключові слова: наночастинки Cu^{2+} і Zn^{2+} , пшениця, передпосівна обробка насіння, ТБК-активні продукти, супероксиддисмутаза, каталаза.

Зміни клімату найчастіше пов'язують із глобальним потеплінням і посухами. Виходячи із сучасних прогнозів, передбачається, що до 2025 року приблизно 1,8 мільярда людей зіткнуться з абсолютною нестачею води і 65 % населення у світі будуть жити в умовах часткової нестачі води [1].

У світовому масштабі зернові злаки займають більш ніж 50 % загального врожаю, а використання зерна має першорядну важливість для виробництва їжі та промислової сировини [2].

Водночас зернові культури дуже потерпають від недостатнього водозабезпечення, демонструючи різні морфологічні, фізіологічні, біохімічні та молекулярні реакції на посуху. У вегетативні та генеративні фази розвитку рослин посуха може викликати негативні зворотні і незворотні зміни фізіологічного стану рослин [3–6].

При цьому сучасні агротехнології, спрямовані на підвищення врожайності часто не враховують екологічний фактор, особливо в країнах, що розвиваються. Водночас вартість добрив і меліорації з кожним роком підвищується у зв'язку з подорожчанням вартості первинних ресурсів, необхідних для їх впровадження в агровиробництво, що ставить під загрозу продовольчу безпеку багатьох країн. У зв'язку з цим для вирішення питання підвищення врожайності агрокультур і стабільного природокористування в умовах посухи необхідно є розробка нових екологічно безпечних підходів, які не потребують великих фінансових витрат. Вони мають базуватися на принципі стимулювання адаптаційного потенціалу рослин в умовах посухи за рахунок пластичних та енергетичних резервів рослини [7].

Використання нанотехнологій, на нашу думку, може допомогти у вирішенні цього питання. Цьому може послужити як відносна дешевизна виробництва наночастинок [8], так і низькі витрати цих препаратів на посівних площах [9], а також їх слабка фітотоксичність.

Вплив наночастинок на фізіологічний стан рослин пшениці на різних рівнях їх організації, починаючи з молекулярного, було вивчено у багатьох рослин. Відомо, що наночастинок в різних концентраціях можуть індукувати як позитивні, так і негативні біологічні ефекти [10]. У багатьох роботах описувався токсичний вплив наночастинок на ріст рослин, їх розвиток і репродукцію [11–14].

Водночас результати наших попередніх робіт показали, що наночастинок, отримані шляхом фізичного синтезу, мають більш низьку фітотоксичність [15] порівняно з наночастинками, отриманими шляхом хімічного синтезу.

Особливий інтерес викликає питання використання бінарних композицій наночастинок в агротехнологіях для підвищення біологічної продуктивності агрокультур у зв'язку з його недостатнім дослідженням. Зокрема, найбільш актуальним є пошук способів підвищення адаптаційного потенціалу культурних рослин у стресових умовах за допомогою нанопрепаратів.

У зв'язку з цим цікавими та перспективними також є результати, отримані на агрокультурах, зокрема на озимій пшениці, яка була вирощена в умовах водного дефіциту в представленому експерименті.

Метою цієї роботи було визначення впливу колоїдного розчину наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} на про/антиоксидантний баланс та морфометричні параметри проростків пшениці сортів пшениці лісостепового і степового екотипів в умовах посухи.

Матеріали та методи досліджень. У роботі було використано сорти рослин озимої пшениці *Triticum aestivum* L. Столична (лісостеповий екотип, чутливий до посухи сорт) і Акведук (степовий екотип, стійкий до посухи сорт).

У досліді проводили передпосівну обробку насіння пшениці колоїдним розчином наночастинок металів Cu^{2+} і Zn^{2+} . Варіанти досліді були такими: 1 – контроль (вирощування за оптимальних умов водозабезпечення), 2 – передпосівна обробка колоїдним розчином наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} , вирощування за оптимальних умов водозабезпечення, 3 – посуха, 4 – посуха, передпосівна обробка насіння колоїдним розчином наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} .

Колоїдний розчин було створено на кафедрі технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства Національного університету біорізноманіття та природокористування України шляхом диспергування гранул міді і цинку імпульсами електричного струму з амплітудою 100–2000 А [16]. Насіння замочували в дослідних розчинах (1 частина маточного колоїдного розчину : 100 частин води) на 4 години, а потім відмивали дисти-

льованою водою і поміщали в термостат на добу за температури 25°C. Контрольний варіант замочували в дистильованій воді. Потім насіння висаджували в піщану культуру і вирощували за температури 25°C (фотоперіод 16 год, густина потоку фотонів 250 мк/моль · м²с⁻¹), і поливали дистильованою водою. Вологість ґрунту підтримували на рівні 70 % від повної вологоємності [17]. Густина посіву становила 70 рослин на одну вегетаційну посудину (0,29 м²). Модельовану посуху створювали на 8 добу після появи сходів шляхом припинення поливу і підтримували на рівні 30 % від ПВ протягом 3 діб. Після цього вимірювали фізіологічні та біохімічні показники проростків. Інтенсивність перекисного окиснення ліпідів визначали за вмістом ТБК-активних продуктів, використовуючи реакцію з 2-тіобарбітуровою кислотою [18]. Активність супероксиддисмутази (СОД) вимірювали за Гіанополітисом і Райзом [19], каталази за Кумаром та ін. [20]. Вміст фотосинтетичних пігментів в листках визначали після їх екстракції диметилсульфоксидом

при температурі 63°C протягом 3 год. [21]. Відносний вміст води в листках визначали за Смартом [22], а площу листової поверхні – за Чанда [23]. Експеримент було здійснено в 3 біологічних і аналітичних повторностях. Статистичну обробку експериментальних результатів здійснювали за допомогою програми "Microsoft Excel".

Результати та їх обговорення. Аналіз отриманих в роботі результатів демонструє, що вирощування проростків пшениці в умовах посухи призводило до збільшення вмісту ТБК-активних продуктів в фотосинтетичних тканинах як сорту Столична (на 27 %), так і сорту Акведук (на 30 %), що є свідченням розвитку окиснювального стресу. Водночас слід зазначити, що передпосівна обробка наночастинками металів не викликала підвищення вмісту ТБК-активних продуктів під час вирощування проростків за нормальних умов, а в умовах посухи сприяла зниженню їх вмісту в листках сорту Столична на 11 % і сорту Акведук – на 22 % (рис. 1).

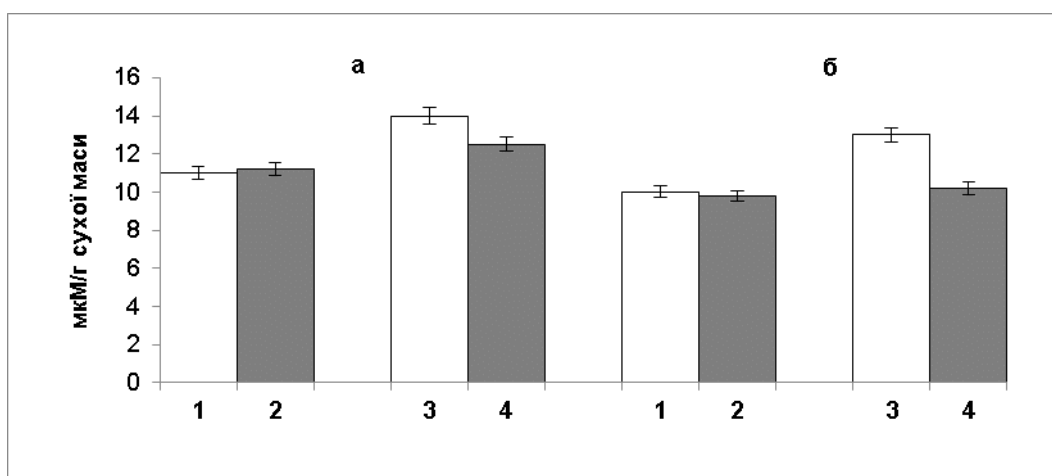


Рис. 1. Вплив колоїдного розчину наночастинок Cu²⁺ і Zn²⁺ на вміст ТБК-активних продуктів в листках проростків озимої пшениці сортів Столична (а) і Акведук (б) в умовах посухи: 1 – контроль, 3 – посуха, 2 – Cu²⁺ і Zn²⁺, 4 – Cu²⁺ і Zn²⁺ + посуха

Активність СОД в листках проростків сорту лісостепового еко типу Столична за нормальних умов була вищою ніж у сорту степового еко типу Акведук на 31 %. Також з'ясувалося, що обробка насіння колоїдним розчином наночастинок Cu²⁺ і Zn²⁺ викликала збільшення

активності СОД на 22 % в умовах модельованої посухи в листках проростків сорту степового еко типу Акведук порівняно з проростками цього сорту, які перебували в умовах посухи без передпосівної обробки рослин наночастинами (рис. 2).

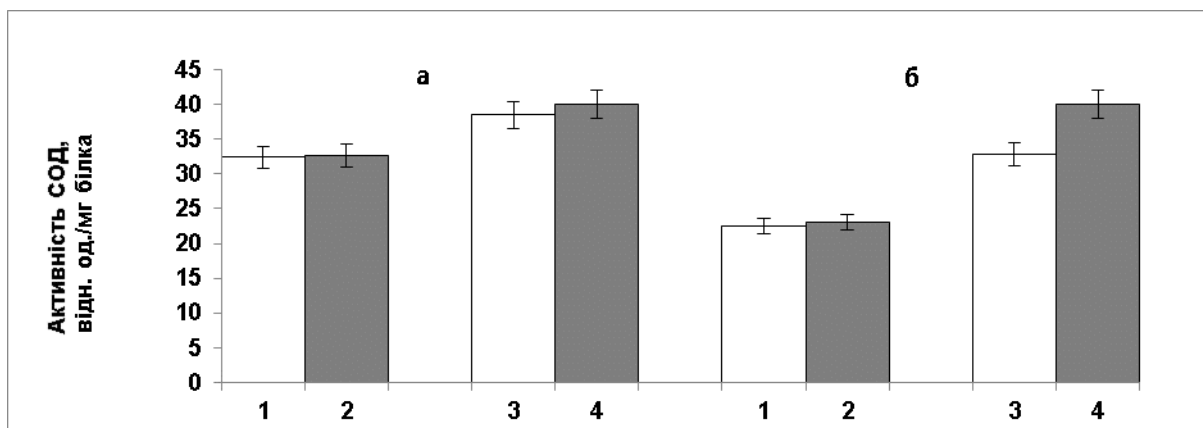


Рис. 2. Вплив колоїдного розчину наночастинок Cu²⁺ і Zn²⁺ на активність СОД в листках проростків озимої пшениці сортів Столична (а) і Акведук (б) в умовах посухи: 1 – контроль, 3 – посуха, 2 – Cu²⁺ і Zn²⁺, 4 – Cu²⁺ і Zn²⁺ + посуха

Водночас подібну тенденцію спостерігали і для каталази. Активність цього ферменту змінювалася у проростків після екзогенної обробки рослин наночастинками. У той же час для сорту Акведук, наночастинки металів індукували підвищення активності каталази на 21 % в умовах посухи порівняно з проростками, які перебували в умовах модельованої посухи без передпосівної обробки насіння наночастинками (рис. 3). Виходячи з нашої гіпотези, активація антиоксидантної системи рослин під впливом бінарної композиції наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} в нашій роботі, пов'язана з можливим залученням наночастинок в ензиматичні реакції мета-

болізму рослин. Ця гіпотеза підтверджується тим, що наночастинки можуть транспортуватися через клітини епідермісу і завдяки своїм малим розмірам, можливий їх контакт з високомолекулярними органічними сполуками клітини. У той же час, була доведена можливість міжклітинного транспорту наночастинок через плазмодесми [24]. На нашу думку, зниження рівня накопичення ТБК-активних продуктів в нашому експерименті в умовах посухи після передпосівної обробки насіння рослин пов'язано з підвищенням активності антиоксидантних ферментів СОД і каталази, за рахунок чого знижувався рівень утворення ТБК-активних продуктів (рис. 1–3).

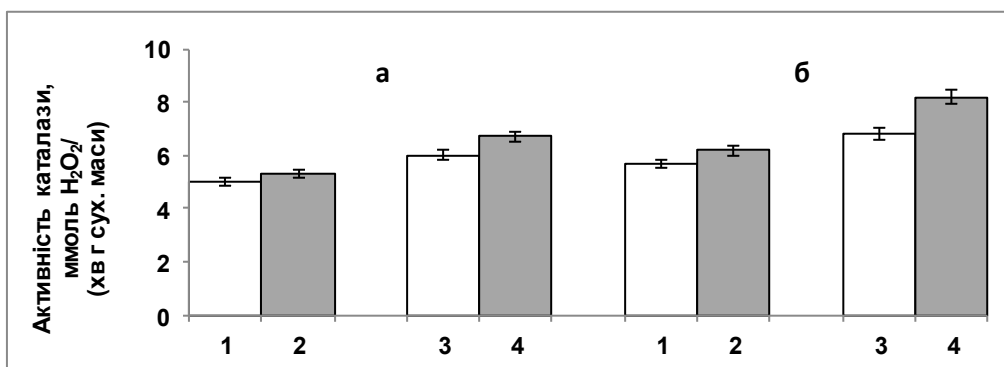


Рис. 3. Вплив колоїдного розчину наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} на активність каталази в листках проростків озимої пшениці сортів Столична (а) і Акведук (б) в умовах посухи: 1 – контроль, 3 – посуха, 2 – Cu^{2+} і Zn^{2+} , 4 – Cu^{2+} і Zn^{2+} + посуха

Вміст фотосинтетичних пігментів в листках проростків озимої пшениці лісостепового (Столична) і степового (Акведук) до посухи сортів також відрізнявся як в умовах модельованої посухи після передпосівної обробки проростків колоїдним розчином наночастинок, так і без цієї обробки. За нормальних умов вміст хлорофілів у листках озимої пшениці сорту Акведук був на 13 % вищим порівняно із сортом Столична. Після обробки насіння колоїдним розчином наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} спостерігали збільшення на 13 % вмісту хлорофілів в листках пшениці сорту Столична порівняно з контролем, а в сорту Акведук достовірних відмінностей за вмістом хлорофілу між цими двома варіантами не спостерігали.

Модельована посуха на рівні 30 % від ПВ індукувала істотне зниження загального вмісту хлорофілів в листках проростків обох сортів Столична та Акведук, причому для сорту Акведук воно було більш істотним (на 45 %) порівняно із сортом Столична (на 29 %). У листках пшениці обох сортів після передпосівної обробки насіння спостерігали менш суттєве зниження вмісту хлорофілів за дії посухи ніж без обробки в умовах водного стресу. Зокрема, колоїдний розчин наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} індукував зменшення вмісту хлорофілів на 18 % і 22 % за дії посухи порівняно з контролем (рис. 4).

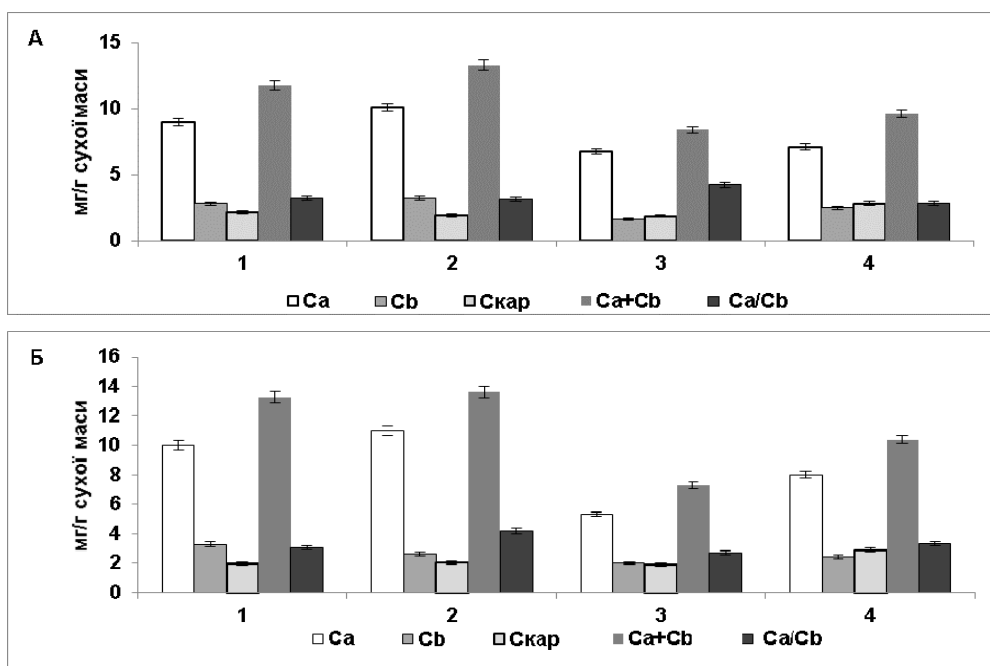


Рис. 4. Вміст фотосинтетичних пігментів в листках озимої пшениці сортів Столична (А) і Акведук (Б): 1 – контроль; 2 – Cu^{2+} і Zn^{2+} ; 3 – посуха; 4 – посуха + Cu^{2+} і Zn^{2+}

Водночас спостерігали зміни вмісту окремих форм хлорофілу та їх співвідношень для окремих варіантів досліду. Передпосівна обробка насіння колоїдним розчином наночастинок індукувала підвищення вмісту хл а в листках на 12 % у сорту Столична та на 10 % у сорту Акведук. У сорту Столична вміст хл а в умовах посухи знижувався на 24 %, проте передпосівна обробка колоїдним розчином наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} індукувала зниження вмісту хл а на 21 % за дії водного стресу. Для сорту Акведук спостерігали подібну тенденцію – посуха викликала зменшення вмісту хл а на 47 %, хоча передпосівна обробка колоїдним розчином наночастинок індукувала зниження вмісту хл а лише на 20 % (рис. 4). Вміст хл b також варіював в умовах посухи без обробки та з обробкою розчином наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} . У сорту Столична спостерігали збільшення вмісту хл b в листках на 14 %, а у сорту Акведук він знижувався на 20 % після передпосівної обробки насіння. У той же час за умов посухи спостерігали зниження вмісту хл b на 43 % у сорту Столична та на 40 % у сорту Акведук. У проростків пшениці після передпосівної обробки наночастинок за дії посухи спостерігали зниження вмісту хлорофілів у сорту Столична на 11 % і у сорту Акведук на 27 %. Співвідношення хл а / хл b в листках проростків пшениці змінювалося за сумісної дії наночастинок і посухи. Змін співвідношення хл а / хл b в листках проростків сорту Столична після передпосівної обробки наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} не спостерігали, а у сорту Акведук воно збільшувалося на 37 %. Посуха індукувала збільшення співвідношення хл а / хл b на 32 % в листках сорту Столична, а у сорту Акведук – зниження на 18 %. Передпосівна обробка наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} викликала зниження співвідношення хл а / хл b на 12 % в листках сорту Столична та його підвищення в листках сорту Акведук на 37 %. Посуха, навпаки, індукувала підвищення співвідношення хл а/хл b на 32 % у чутливого сорту Столична та зниження на 12 % у стійкого до дії посухи сорту Акведук (рис. 4).

Зміни вмісту фотосинтетичних пігментів в листках у відповідь на вплив нанопрепаратів були продемонстровані в роботах [25, 26]. Цікаві результати були отримані на рослинах сої з додаванням наночастинок суперпа-

рамагнетичного оксиду заліза (SPIONs) в гідропонне середовище. Спостерігали збільшення вмісту хлорофілу в субапикальних листках сої, хоча це і не призводило до збільшення фотосинтетичної продуктивності. Було також помічено, що дія SPIONs на вміст хлорофілів може мати вплив на фотохімічні реакції [25]. Крім того, було підтверджено включення наночастинок у фотосинтетичний метаболізм. Зокрема, було доведено, що наночастинки золота можуть виступати як штучним акцептором, так і донором електронів під час фотосинтезу [27].

Збільшення співвідношення хл а/хл b за дії наночастинок може свідчити про зміну стехіометрії світлозбиральних комплексів ФС I і ФС II і, опосередковано, про зміну їхньої активності по відношенню одна до одної [28].

Вміст каротиноїдів в листках пшениці сорту Столична після впливу наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} знижувався на 10 %. У сорту Акведук наночастинки не чинили впливу на вміст каротиноїдів в листках за нормальних умов водного режиму.

В умовах посухи загальний вміст каротиноїдів знижувався на 14 % в листках сорту Столична, а в листках сорту Акведук не відрізнялася від контролю. У той же час після попередньої обробки насіння наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} за дії посухи вміст каротиноїдів збільшилася на 31 % в листках сорту Столична та на 50 % в листках сорту Акведук.

У нашій роботі збільшення вмісту каротиноїдів в листках проростків, вирощених з насіння, передпосівна обробка якого здійснювалася розчином наночастинок після впливу посухи демонструє добре відомий адаптаційний механізм [29]. Зокрема, каротиноїди з одного боку є низькомолекулярними антиоксидантами, біосинтез яких в листках збільшується у відповідь на стрес за рахунок гасіння активних форм кисню, а з іншого – за рахунок фізико-хімічних властивостей своїх молекул вони розширюють спектр поглинання доступної для рослин світлової радіації.

Істотне підвищення вмісту каротиноїдів у проростках посухостійкого сорту Акведук порівняно з нестійким до посухи сортом Столична поряд з високою активністю СОД і каталази в їх листках вказують на більш високий антиоксидантний статус досліджених рослин.

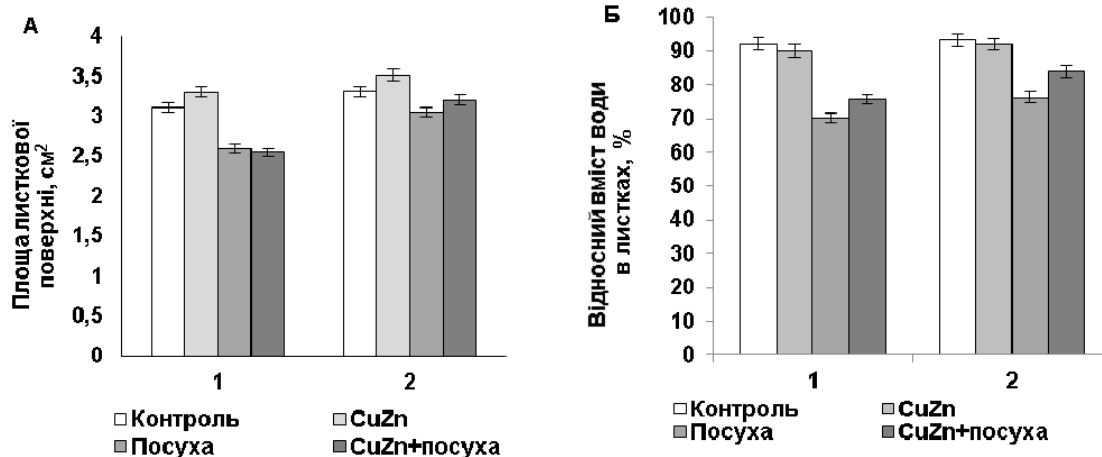


Рис. 5. Площа листової поверхні (А) і відносний вміст води в листках (Б) озимої пшениці сортів Столична та Акведук за дії посухи і колоїдного розчину наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} :

1 – Столична, 2 – Акведук

Передпосівна обробка насіння пшениці колоїдним розчином наночастинок не викликала змін розмірів площі листової поверхні за нормальних умов водного режиму рослин у обох сортів. Посуха індукувала зменшення площі листової поверхні у проростків сорту

Столична на 16 % і Акведук на 8 %. У той же час дія наночастинок за посухи індукувала невелике збільшення площі листової поверхні у посухостійкого сорту Акведук (на 5 % порівняно з попереднім варіантом) (рис. 5).

Тенденцію збільшення площі листової поверхні листків за дії наночастинок було описано в роботі [30], присвяченій вивченню впливу трьох різних фізичних форм наночастинок оксиду цинку на морфометричні показники рослин кукурудзи. Спостерігалось збільшення площі листової поверхні рослин під впливом всіх трьох форм окремо.

Відносний вміст води в листках після обробки насіння колоїдним розчином наночастинок за нормальних умов водозабезпечення не змінювався в рослинах обох сортів, хоча в умовах посухи спостерігали зниження цього показника – на 24 % в проростках сорту Столична та 18 % в проростках сорту Акведук відповідно. Навпаки, сумісний вплив колоїдного розчину наночастинок і посухи індукував підвищення відносного вмісту води в листках на 8 % у рослин сорту Столична та 10 % у рослин сорту Акведук порівняно з проростками обох сортів, які перебували в умовах посухи (рис. 5).

Позитивний вплив на фізіологічний стан проростків за дії посухи було виявлено за змінами відносного вмісту води в листках, яке було вищим у проростків, вирощених з насіння яке було попередньо оброблене колоїдним розчином наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} . Подібний ефект був виявлений після впливу наночастинок анальциту на рослини пшениці і кукурудзи [31].

Таким чином, в умовах посухи спостерігався адаптивний ефект впливу наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} на стан фотосинтетичного апарату, який проявлявся як у вигляді змін вмісту і співвідношення фотосинтетичних пігментів, так і на рівні антиоксидантної системи, і в кінцевому підсумку на рівні організму – за показниками водного режиму проростків і їх морфометричних параметрів.

Висновки. В умовах посухи колоїдний розчин наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} спричиняв позитивний вплив на про / антиоксидантний баланс рослин і морфометричні параметри листків більшою мірою у проростків сорту степового екотипу (Акведук) і в меншій – у проростків сорту лісостепового екотипу (Столична). Спостерігалось зниження рівня накопичення ТБК-активних продуктів і підвищення активності антиоксидантних ферментів – СОД і каталази, що характеризує підвищення антиоксидантного статусу рослин за дії наночастинок в умовах посухи.

Зміна співвідношення хлорофілу в листках (хл а/хл b) поряд з підвищенням вмістом каротиноїдів в листках характеризувало прояв адаптації рослин до посухи за дії колоїдного розчину наночастинок Cu^{2+} і Zn^{2+} . На додаток, зміни морфометричних параметрів рослин, таких як площа листової поверхні і відносний вміст води в листках є наслідком індукції адаптаційних механізмів у досліджених рослин в умовах посухи на організменному рівні.

Список використаних джерел:

1. Nezhadahmadi A. Drought tolerance in wheat / A. Nezhadahmadi, Z. H. Prodhan, G. Faruq // *Sci World J.* – 2013. – № 610721. doi: 10.1155/2013/610721.
2. Mochida K. Unlocking Triticeae genomics to sustainably feed the future / K. Mochida, K. Shinozaki // *Plant Cell Physiol.* – 2013. – № 54. – P. 1931–1950.
3. Accumulation of osmoprotectants in wheat varieties of different drought tolerance/ Z. S. Szegletes, L. Erdei, I. Tari, L. Cseuz // *Cereal Res. Commun.* – 2000. – № 28. – P. 403–410.
4. Zhu J. K. Salt and drought stress signal transduction in plants / J. K. Zhu // *Ann Rev Plant Biol.* – 2002. – № 53. – P. 247–273.
5. Lawlor D. W. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants / D. W. Lawlor, G. Cornic // *Plant Cell Environ.* – 2002. – № 25. – P. 275–294.
6. Yordanov I. Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance/ I. Yordanov, V. Velikova, T. Tsonev // *Photosynthetica.* – 2000. – № 38. – P. 171–186.
7. Kang Y. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security / Y. Kang, S. Khan, X. Ma // *Prog Nat Sci.* – 2009. – № 19. – P. 1665–1674.
8. Biocompatible magnetite/gold nanohybrid contrast agents via green chemistry for MRI and CT bioimaging / S. Narayanan, B. N. Sathy, U. Mony et al. // *ACS Appl Mater Interfaces.* – 2012. – № 4. – P. 251–260.
9. Using a colloidal solution of metal nanoparticles as micronutrient fertilizer for Cereals / L. M. Batsmanova, L. M. Gonchar, N. Yu. Taran et al. // *Proc. Int. Conf. Nanomaterials: Appl. Properties.* – 2013. – Vol. 2(4). – P. 04NABM14-1–04NABM14-2.
10. The effect of copper and zinc nanoparticles on the growth parameters, contents of ascorbic acid, and qualitative composition of amino acids and acylcarnitines in *Pistia stratiotes* L. (Araceae) / O. Olkhovych, M. Volkogon, N. Taran et al. – *Nanoscale Res Lett.* – 2016. – Vol. 11. № 218. doi:1186/s11671-016-1422-9
11. Silver nanoparticle toxicity effect on growth and cellular viability of the aquatic plant *Lemna gibba* / A. Oukarroum, L. Barhoumi, L. Pirastru, D. Dewez // *Environ. Toxicol. Chem.* – 2013. – № 32(4). – P. 902–907.
12. Chichiriccò G. Penetration and toxicity of nanomaterials in higher plants / G. Chichiriccò, A. Poma // *Nanomaterials.* – 2015. – № 5(2). – P. 851–873.
13. Mustafa G. Toxicity of heavy metals and metal-containing nanoparticles on plants / G. Mustafa, S. Komatsu // *Biochimica et Biophysica Acta.* – 2016. – № 1864 (8). – P. 932–944.
14. Silver and titanium dioxide nanoparticle toxicity in plants: a review of current research / A. Cox, P. Venkatachalam, S. Sahi, N. Sharma // *Plant Physiol Biochem.* – 2016 – № 107. – P. 147–163.
15. Phytotoxicity of colloidal solutions of metal-containing nanoparticles / I. O. Konotop, M. S. Kovalenko, V. Z. Ulynets et al. // *Cytol Genet.* – 2014. – № 48(2). – P. 99–102.
16. Mother colloidal solution of metals / K. H. Lopatko, E. H. Afandilants, S. M. Kalenska, O. L. Tonkha. B01J 13/00 Patent of Ukraine № 38459, 12 Jan 2009.
17. Современные методы исследования и оценки засухо- и жароустойчивости растений : метод. пособ. / И. А. Григорюк, В. И. Ткачев, С. В. Савинский, Н. Н. Мусиенко. – К. : Науковий світ, 2003. – 139 с.
18. Андреева Л. И. Модификация метода определения перекисей липидов в тесте с тиобарбитуровой кислотой / Л. И. Андреева, Л. А. Кожемякин, А. А. Кишкун // *Лаб. дело.* – 1988. – № 11. – С. 41–43.
19. Giannopolitis C. N. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants / C. N. Giannopolitis, S. K. Ries // *Plant Physiol.* – 1977. – № 59(2). – P. 309–314.
20. Kumar C. N. Changes in lipid peroxidation and lipolytic and free-radical scavenging enzyme during aging and sprouting of potato (*Solanum tuberosum* L.) seed-tubers / C. N. Kumar, N. Knowles // *Plant Physiol.* – 1993. – № 102. – P. 115–124.
21. Wellburn A. R. The spectral determination of chlorophylls a and b as well as the total carotenoids using various solvents with spectrophotometers of different resolution / A. R. Wellburn // *J Plant Physiol.* – 1994. – № 144(3). – P. 307–313.
22. Smart R. E. Rapid estimates of relative water content/ R. E. Smart, G. E. Bingham // *Plant Physiol.* – 1974. – № 53(2). – P. 258–260.
23. Chanda S. V. Estimation of leaf area in wheat using linear measurements / S. V. Chanda, Y. D. Singh // *Plant Breed Seed Sci.* – 2002. – № 46(2). – P. 75–79.
24. Transport of gold nanoparticles through plasmodesmata and precipitation of gold ions in woody poplar / G. Zhai, K. S. Walters, D. W. Peate, P. J. J. Alvarez, J. L. Schnoor // *Environ Sci Technol Lett.* – 2014. – № 1(2). – P. 146–151.
25. Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll / M. H. Ghafariyan, M. J. Malakouti, M. R. Dadpour et al. // *Environ Sci Technol.* – 2013. – № 47(18). – P. 10645–10652.
26. Interaction between chlorophyll and silver nanoparticles: a close analysis of chlorophyll fluorescence quenching. / W. F. Falco, A. M. Queiroz, J. Fernandes et al. // *J Photochem Photobiol A Chem.* – 2015. – № 299. – P. 203–209.
27. Barazzouk S. Photoinduced electron transfer between chlorophyll a and gold nanoparticles/ S. Barazzouk, P. V. Kamat, S. Hotchandani // *J. Phys. Chem. B.* – 2005. – № 109 (2). – P. 716–723.
28. Green B. R. The chlorophyll-carotenoid proteins of oxygenic photosynthesis/ B. R. Green, D. G. Durnford // *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol.* – 1996. – № 47. – P. 685–714.
29. Havaux M. The violaxanthin cycle protects plants from photooxidative damage by more than one mechanism/ M. Havaux, K. K. Niyogi // *Proc Natl Acad Sci. USA.* – 1999. – № 96. – P. 8762–8767.
30. The effects of zinc oxide nanoparticles on growth parameters of corn (SC704)/ M. Taheri, H. A. Qarache, A. A. Qarache, M. Yoosefi // *STEM Fellowship J.* – 2015. – № 1(2). – P. 17–20.
31. Enhancement of drought resistance in wheat and corn by nanoparticles of natural mineral analcite/ N. V. Zaimenko, N. P. Didyk, O. I. Dzyuba et al. // *Ecologia Balkanica* – 2014. – № 6(1). – P. 1–10.

References:

1. Nezhadahmadi A., Prodhan G. Faruq Drought tolerance in wheat/ *Sci World J.* – 2013. – 610721. doi: 10.1155/2013/610721.
2. Mochida K., Shinozaki K. Unlocking Triticeae genomics to sustainably feed the future/ *Plant Cell Physiol.* – 2013. – 54. – P.1931–1950.
3. Szegletes Z., Erdei L., Tari I., L. Cseuz Accumulation of osmoprotectants in wheat varieties of different drought tolerance // *Cereal Res. Commun.* – 2000. – № 28. – P. 403–410.
4. Zhu J. Salt and drought stress signal transduction in plants // *Ann Rev Plant Biol* – 2002. – 53. – P. 247–273.
5. Lawlor D., Cornic G. Photosynthetic carbon assimilation and associated metabolism in relation to water deficits in higher plants // *Plant Cell Environ.* – 2002. – 25. – P. 275–294.
6. Yordanov I., Velikova V., Tsonev T. Plant responses to drought, acclimation, and stress tolerance// *Photosynthetica.* – 2000. – 38. – P. 171–186.

7. Kang Y., Khan S., Ma X. Climate change impacts on crop yield, crop water productivity and food security // *Prog Nat Sci*. – 2009. – 19. – P. 1665–1674.
8. Narayanan S., Sathy B., Mony U., Koyakutty M., Nair S., Menon D. Biocompatible magnetite/gold nanohybrid contrast agents via green chemistry for MRI and CT bioimaging // *ACS Appl Mater Interfaces*. – 2012. – 4. – P. 251–260.
9. Batsmanova L., Gonchar L., Taran N., Okanenko A. Using a colloidal solution of metal nanoparticles as micronutrient fertilizer for Cereals // *Proc Int Conf Nanomaterials Appl Properties*. – 2013. – 2(4). – P. 04NABM14-1–04NABM14-2.
10. Olkhovych O., Volkogon M., Taran N., Batsmanova L., Kravchenko I. (2016) The effect of copper and zinc nanoparticles on the growth parameters, contents of ascorbic acid, and qualitative composition of amino acids and acylcarnitines in *Pistia stratiotes* L. (Araceae). – *Nanoscale Res Lett*. – 11 – 218. doi:10.1186/s11671-016-1422-9
11. Oukarroum A., Barhoumi L., Pirastru L., Dewez D. Silver nanoparticle toxicity effect on growth and cellular viability of the aquatic plant *Lemna gibba* // *Environ. Toxicol. Chem.* – 2013. – 32(4). – P. 902–907.
12. Chichiricò G., Poma A. Penetration and toxicity of nanomaterials in higher plants // *Nanomaterials*. – 2015. – 5(2). – P. 851–873.
13. Mustafa G., Komatsu S. Toxicity of heavy metals and metal-containing nanoparticles on plants // *Biochimica et Biophysica Acta*. – 2016. – 1864 (8). – P. 932–944.
14. Cox A., Venkatachalam P., Sahi S., Sharma N. Silver and titanium dioxide nanoparticle toxicity in plants: a review of current research // *Plant Physiol Biochem*. – 2016 – 107. – P. 147–163.
15. Konotop I., Kovalenko M., Ulynets V., Meleshko A., Batsmanova L., Taran N. Phytotoxicity of colloidal solutions of metal-containing nanoparticles // *Cytol Genet*. – 2014. – 48(2). – P. 99–102.
16. Lopatko K., Aftandilias E., Kalenska S., Tonkha O. Mother colloidal solution of metals. B01J 13/00 Patent of Ukraine No. 38459 12 Jan 2009.
17. Григорюк И., Ткачев В., Савинский С., Мусиенко Н. Современные методы исследования и оценки засухи и жароустойчивости растений: Метод. пособ. – К.: Науковий світ, 2003. – 139 с.
18. Андреева Л., Кожемякин Л., Кишкун А. Модификация метода определения перекисей липидов в тесте с тиобарбитуровой кислотой // *Лаб. дело*. – 1988. – № 11. – С. 41–43.
19. Giannopolitis C., Ries S. Superoxide dismutases: I. Occurrence in higher plants // *Plant Physiol*. – 1977. – 59(2). – P. 309–314.
20. Kumar C., Knowles N. Changes in lipid peroxidation and lipolytic and free-radical scavenging enzyme during aging and sprouting of potato (*Solanum tuberosum* L.) seed-tubers // *Plant Physiol*. – 1993. – 102. – P. 115–124.
21. Wellburn A., The spectral determination of chlorophylls a and b as well as the total carotenoids using various solvents with spectrophotometers of different resolution // *J Plant Physiol*. – 1994. – 144(3). – P. 307–313.
22. Smart R., Bingham G. Rapid estimates of relative water content // *Plant Physiol*. – 1974. – 53(2). – P. 258–260.
23. Chanda S., Singh Y. Estimation of leaf area in wheat using linear measurements // *Plant Breed Seed Sci*. – 2002. – 46(2). – P. 75–79.
24. Zhai G., Walters K., Peate D., Alvarez P., Schnoor J. Transport of gold nanoparticles through plasmodesmata and precipitation of gold ions in woody poplar // *Environ Sci Technol Lett*. – 2014. – 1(2). – P. 146–151.
25. Ghafariyan M., Malakouti M., Dadpour M., Stroeve P., Mahmoudi M. Effects of magnetite nanoparticles on soybean chlorophyll // *Environ Sci Technol*. – 2013. – 47(18). – P. 10645–10652.
26. Falco W., Queiroz A., Fernandes J., Botero E., Falcão E., Guimarães F. Interaction between chlorophyll and silver nanoparticles: a close analysis of chlorophyll fluorescence quenching // *Photochem Photobiol A Chem*. – 2015. – 299. – P. 203–209.
27. Barazzouk S., Kamat P., Hotchandani S. Photoinduced electron transfer between chlorophyll a and gold nanoparticles // *J. Phys. Chem. B*. – 2005. – 109 (2). – P. 716–723.
28. Green B., Durnford D. The chlorophyll-carotenoid proteins of oxygenic photosynthesis // *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*. – 1996. – 47. – P. 685–714.
29. Havaux M., Niyogi K. The violaxanthin cycle protects plants from photooxidative damage by more than one mechanism // *Proc Natl Acad Sci USA*. – 1999. – 96. – P. 8762–8767.
30. Taheri M., Qarache H., Qarache A., Yoosefi M. The effects of zinc oxide nanoparticles on growth parameters of corn (SC704) // *STEM Fellowship J*. – 2015. – 1(2). – P. 17–20.
31. Zaimenko N., Didyk N., Dzyuba O., Zakrasov O., Rositska N., Viter A. Enhancement of drought resistance in wheat and corn by nanoparticles of natural mineral analcite // *Ecologia Balkanica*. – 2014. – 6(1). – P. 1–10.

Надійшла до редколегії 21.09.2018

Отримано виправлений варіант 23.10.2018

Підписано до друку 23.10.2018

Received in the editorial 21.09.2018

Received a revised version on 23.10.2018

Signed in the press on 23.10.2018

В. Стороженко, канд. биол. наук, Н. Светлова, канд. биол. наук, Н. Коваленко, асп.,
Л. Бацманова, канд. биол. наук, Н. Таран, д-р биол. наук, проф.
УНЦ "Інститут біології і медицини",
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ИНДУКЦИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОРОСТКОВ ПШЕНИЦЫ К ДЕЙСТВИЮ МОДЕЛИРУЕМОЙ ЗАСУХИ КОЛЛОИДНЫМ РАСТВОРОМ НАНОЧАСТИЦ Cu^{2+} И Zn^{2+}

Исследовано влияние коллоидного раствора наночастиц Cu^{2+} и Zn^{2+} на про/антиоксидантный баланс, содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов а, b и каротиноидов), соотношение хлорофиллов и морфометрические показатели (относительное содержание воды в листьях, площадь листовой поверхности) проростков озимой пшеницы *Triticum aestivum* L. сортов Акведук (степной экотип, устойчивый к засухе) и Столичная (лесостепной экотип, чувствительный к засухе) в условиях моделируемой засухи. Засуху создавали путем прекращения полива на 8-е сутки после появления всходов и поддержания влажности почвы на уровне 30 % от полной влагоемкости в течение 3 суток. Предпосевную обработку семян наночастицами Cu^{2+} и Zn^{2+} проводили путем замачивания в опытном растворе (1 часть маточного коллоидного раствора: 100 частей воды) в течение 4 часов. Контрольный вариант замачивали в дистиллированной воде. Затем семена отмывали и высаживали в песчаную культуру. Выявлено сортовую специфичность влияния коллоидного раствора наночастиц металлов на проростки сортов Акведук и Столичная. Предпосевная обработка семян наночастицами Cu^{2+} и Zn^{2+} приводила к существенным изменениям про/антиоксидантного баланса в листьях проростков, которые заключались в снижении уровня накопления ТБК-активных продуктов, повышению активности ключевых антиоксидантных ферментов (супероксиддисмутазы и каталазы), стабилизации содержания фотосинтетических пигментов, увеличении относительного содержания воды в листьях и площади листовой поверхности в условиях моделируемой засухи.

В целом в условиях засухи предпосевная обработка семян коллоидным раствором наночастиц оказывала положительное влияние на про/антиоксидантный баланс растений и морфометрические параметры листьев в большей степени у проростков сорта степного экотипа (Акведук) и в меньшей – у проростков сорта лесостепного экотипа (Столичная).

Ключевые слова: наночастицы Cu^{2+} и Zn^{2+} , пшеница, предпосевная обработка семян, ТБК-активные продукты, супероксиддисмутаза, каталаза.

V. Storozhenko, PhD, N. Svetlova, PhD, M. Kovalenko, Postgraduate stud., , L. Batsmanova, PhD, N. Taran, DSc, Prof.
ESC "Institute of Biology and Medicine",
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

INDUCTION OF WHEAT SEEDLINGS RESISTANCE OF DIFFERENT ECOTYPES TO THE EFFECT OF A DROUGHT SIMULATED BY A COLLOIDAL SOLUTION OF Cu^{2+} AND Zn^{2+} NANOPARTICLES

The aim of the investigation was to study the effect of colloidal solution of Cu^{2+} and Zn^{2+} nanoparticles on the pro/antioxidant balance, the content of photosynthetic pigments (chlorophylls a, b and carotenoids), the chlorophyll a/b ratio and the morphometric parameters (relative leaf water content, leaf area) of winter wheat *Triticum aestivum* L. varieties Acveduc (steppe ecotype, resistant to drought) and Stolichna (forest-steppe ecotype, sensitive to drought) under conditions of simulated drought. The drought was created by stopping of watering on the 8th day after emergence and maintaining the soil moisture at 30 % of the total moisture capacity for 3 days. Pre-sowing treatment of seeds with Cu^{2+} and Zn^{2+} nanoparticles was carried out by soaking of seeds in experimental solution (1 part of the mother colloid solution: 100 parts of water) for 4 hours. The control variant was soaked in distilled water. Then the seeds were washed and planted in a sand culture. The varietal specificity of the influence of a colloidal solution of metal nanoparticles on seedlings of the Acveduc and Stolichna varieties was revealed. Presowing treatment of seeds with Cu^{2+} and Zn^{2+} nanoparticles led to significant changes in the pro/antioxidant balance in leaves of seedlings, reducing the level of accumulation of TBARS, increasing the activity of key antioxidant enzymes (superoxide dismutase and catalase), stabilizing the content of photosynthetic pigments, increasing the relative water content in leaves and leaf area under simulated drought conditions.

In general, under drought conditions, presowing of seed treatment with a colloidal solution of nanoparticles had a positive effect on the pro-antioxidant balance of plants and the morphometric parameters of leaves to a greater extent in seedlings of the steppe ecotype variety (Acveduc) and less in seedlings of the forest-steppe ecotype variety (Stolichna).

Key words: Cu^{2+} and Zn^{2+} nanoparticles, wheat, presowing seed treatment, TBARS, superoxide dismutase, catalase.