

УДК: 581.1:631.8

І. Хоменко, асп., О. Косик, канд. біол. наук, Н. Таран, д-р біол. наук, проф.
ННЦ "Інститут біології та медицини",
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

ВПЛИВ ІОНІВ КАДМІЮ ТА ЕСЕНЦІАЛЬНИХ НАНОМЕТАЛІВ НА ФІЗІОЛОГО-БІОХІМІЧНІ ПАРАМЕТРИ РОСЛИН САЛАТУ ПОСІВНОГО

Згідно з метою роботи досліджено вплив передпосівної обробки неіонним колоїдним розчином суміші наночасток металів міді, цинку, мангану й заліза, іонів кадмію та їх сумісної дії на показники вмісту продуктів перекисного окиснення ліпідів і балансу фотосинтетичних пігментів у рослинах *Lactuca sativa* L. двох сортів з різним вмістом антоціанових пігментів (Лоло та Лоло Росса). Було використано спектрофотометричні методи дослідження вмісту пероксидів, тіобарбітурат-активних продуктів за модифікованою методикою Кумар та Ноулс, а також вміст основних пластидних пігментів (хлорофілів а, b, співвідношення а/б, а також пулу каториноїдів) за перерахунками Вінтерманс, де Мотс. За отриманими результатами встановлено зниження вмісту пероксидів та зростання малонового діальдегіду для більшості варіантів обробки сорту Лоло. Протилежну тенденцію спостерігали для сорту Росса (початковий приріст даних параметрів за обробки наночастками металів знижувався до рівня контрольних значень упродовж 14-денної експозиції). У сорту Лоло за впливу наночасток спостерігали зниження вмісту хлорофілів, на відміну від дії кадмію. Для Росса зафіксовано значне падіння вмісту як хлорофілів, так і каротиноїдів у всіх варіантах обробки упродовж експозиції. Показник а/б для рослин Лоло достовірно зростає у варіантах кадмієвого впливу, для Росса відмічено різноспрямованість впливу всіх варіантів обробки. У підсумку виявлено, що обробка сумішшю есенціальних нанометалів виявляла функції адитивного стрес-навантаження, що відображалося у зростанні рівня продуктів ліпопероксидації та зниженні основних пігментних біомаркерів в обох сортах упродовж експозиції у розчині 0,1 мМ кадмію. Сорт Лоло Росса виявив вищу дивергентність результатів за різних систем обробки, порівняно із сортом Лоло.

Ключові слова: наночастки есенціальних металів, продукти ліпопероксидації, пігментний комплекс, *Lactuca sativa* L.

Вступ. Ураховуючи значний рівень антропогенного впливу на сільськогосподарські угіддя України, актуальним є пошук альтернативних джерел вирощування та мінерального живлення важливих аграрних культур. Зростання потреби споживачів у полівітамінних культурах листових овочів призводить до пошуку та поширення нових методів та агротехнологій вирощування цих рослин у закритому ґрунті. Проте, традиційно як в Україні, так і у світі для збільшення виходу врожаю застосовуються підвищені кількості мінеральних добрив, збагачених солями важких металів та хелатних комплексів, що мало засвоюються та за складом і властивостями не відповідають біологічним потребам вирощуваних рослин. Щорічно у світі використовується понад 30 млн т фосфорних добрив, куди солі кадмію входять у вигляді мікрододатків [1]. У результаті, вони здатні накопичуватися у рослинній сировині, знижуючи її якість та продуктивність.

Значної перспективи набуває використання наночасток есенціальних елементів мінерального складу рослин як альтернативного джерела живлення. Нанопрепарати біологічно активних металів станом на сьогодні мають широке застосування у сільському господарстві, оскільки вважаються екологічно-безпечними промоторами стійкості рослин до стрес-факторів різноманітної природи [2]. Проте, не зважаючи на різноспрямованість застосування нанотехнологій у сучасному рослинництві, питання фітотоксичності наночасток біологічно-активних металів на сьогодні досліджено недостатньо, є актуальним та дискусійним. Оскільки нанорозмірні частинки виявляють вищу біологічну активність, здатні швидше проникати у клітини та ефективніше сприйматися рослинами, існує вірогідність як позитивного, так і токсичного їхнього впливу на агрофітоценози. Відповідно до досліджень Карімі [3], вплив наночасток срібла виявляв фітотоксичну дію до рослин *Triticum aestivum*, а в роботі Конотоп зі співавторами [4] за допомогою *Allium*-тесту досліджено вплив колоїдних розчинів наночасток ряду металів і виявлено, що потенційно цитотоксичність розташована таким чином: $Cu \geq Zn > Ag \geq Fe$, а наночастка Mn не виявила достовірного впливу.

Проте ряд авторів [2; 5] указують на потенційно високу фізіолого-біохімічну та продуктивну користь використання нанопрепаратів, особливо із застосуванням передпосівної й фоліарної обробки на різних етапах розвитку культурних рослин. Як комплекс мікроелементів передпосівної обробки насіння найчастіше викорис-

товують неіонні колоїдні розчини наночастинок металів, зокрема заліза, міді, кобальту, молібдену, марганцю, цинку і срібла. Згідно з дослідженням Ліу зі співавторами, обробка насіння *Lactuca sativa* наночастками оксидів Cu, Zn, Mn та Fe призводила до приросту біомаси й розглядається авторами як альтернативний потенційно-ефективний спосіб підживлення [6].

Для індикації ранніх проявів стресового стану рослин під дією антропогенного навантаження на фізіолого-біохімічному рівні використовуються показники інтенсивності процесів ліпопероксидації мембранних структур і стану пігментної системи, які є чутливими до дії полутантів. Техногенні стресори викликають гальмування фотосинтетичних процесів унаслідок руйнування пігментних комплексів, зміни буферної системи та порушення роботи ензимів, які беруть участь у регуляції діяльності клітини [7]. Зміщення прооксидантно-антиоксидантної рівноваги й адаптивні зміни на фізіологічному рівні у клітинах відіграють важливу роль у формуванні адаптивного потенціалу рослинного організму.

Тому **метою** нашої роботи було з'ясування впливу колоїдного розчину суміші наночасток есенціальних металів на рівень прооксидантів і вміст фотосинтетичних пігментів рослин салату посівного (*Lactuca sativa* L.) двох сортів, відмінних за рівнем накопичення вторинних метаболітів.

Матеріали і методи. У роботі досліджували вплив іонів кадмію у концентрації 0,1 мМ і суміші нанометалів (Cu, Zn, Mn, Fe) на одномісячні рослини *Lactuca sativa* сорту Лоло та Лоло Росса. Неіонний колоїдний розчин суміші наночасток металів міді, цинку, мангану та заліза отримано шляхом окремого диспергування гранул даних металів імпульсами електричного струму з амплітудою 100-2000 А у воді на базі кафедри технології конструкційних матеріалів і матеріалознавства Національного університету біоресурсів та природокористування України [8].

Передпосівну обробку насіння сумішшю нанометалів проводили методом барботування упродовж доби (контроль – дистильована вода) з подальшим вирощуванням на 50-відсотковому середовищі Хогленда. У середовище живлення одномісячних рослин дослідних варіантів додавали розчин сульфату кадмію. Рослини, що вирощувались у попередніх умовах системи, були використані як контрольні варіанти. Для визначення впливу сублетальних доз Cd^{2+} та суміші наночасток

зразки листків одного віку відбирали на першу, сьому та 14-ту добу експозиції.

Інтенсивність стресового стану рослин оцінювали за рівнями накопичення продуктів ліпопероксидації (ПОЛ), а саме – пероксидів та тіобарбітурат-активних (ТБК) продуктів. Уміст пероксидів визначали спектрофотометрично при $\lambda = 530$ нм за утворенням забарвленого продукту із одновідсотковим розчином солі Мора у H_2SO_4 . Рівень ПОЛ також оцінювали за $\lambda = 533$ нм за модифікованою методикою Кумар та Ноулс накопичення малонового діальдегіду (МДА) у реакції із дво-тіобарбітуровою кислотою [9]. Уміст хлорофілів а, b та загальної суми каротиноїдів визначали спектрофотометрично із застосуванням формул Вінтерманс, де Мотс для етанолу [10].

Результати опрацьовані статистично за допомогою стандартного пакета програми "Microsoft Excel 2010". Розбіжності між вибірками вважали значущими за $p \leq 0,05$.

Результати та їх обговорення. Провідним показником інтенсивності стресового впливу абіотичних, біо-

тичних та антропогенних факторів вважають активізацію утворення активних форм кисню (АФК) та, як наслідок, накопичення продуктів ліпопероксидації, що супроводжується порушенням структурно-функціональної цілісності клітинних мембран. Накопичення певного пулу АФК активує сигнальні системи адаптивного захисту рослинного організму до токсичної дії підвищених доз важких металів у середовищі. Оскільки вважається, що МДА є одним із найбільш стабільних продуктів ПОЛ, його вміст у тканинах визначають як біомаркер стійкості рослин до стресорів різної природи [11].

За результатами досліджень умісту первинних продуктів ПОЛ у листках дослідних рослин салату сорту Лоло (рис. 1, А) встановлено відсутність достовірної різниці з контролем у більшості варіантів обробки. Значне зниження на 17 % вмісту пероксидів зафіксовано лише для варіанту сумісної дії стрес-факторів на першу добу експозиції. Для варіанту впливу Cd^{2+} також виявлено 12-відсоткове зниження вмісту пероксидів на 14-ту добу.

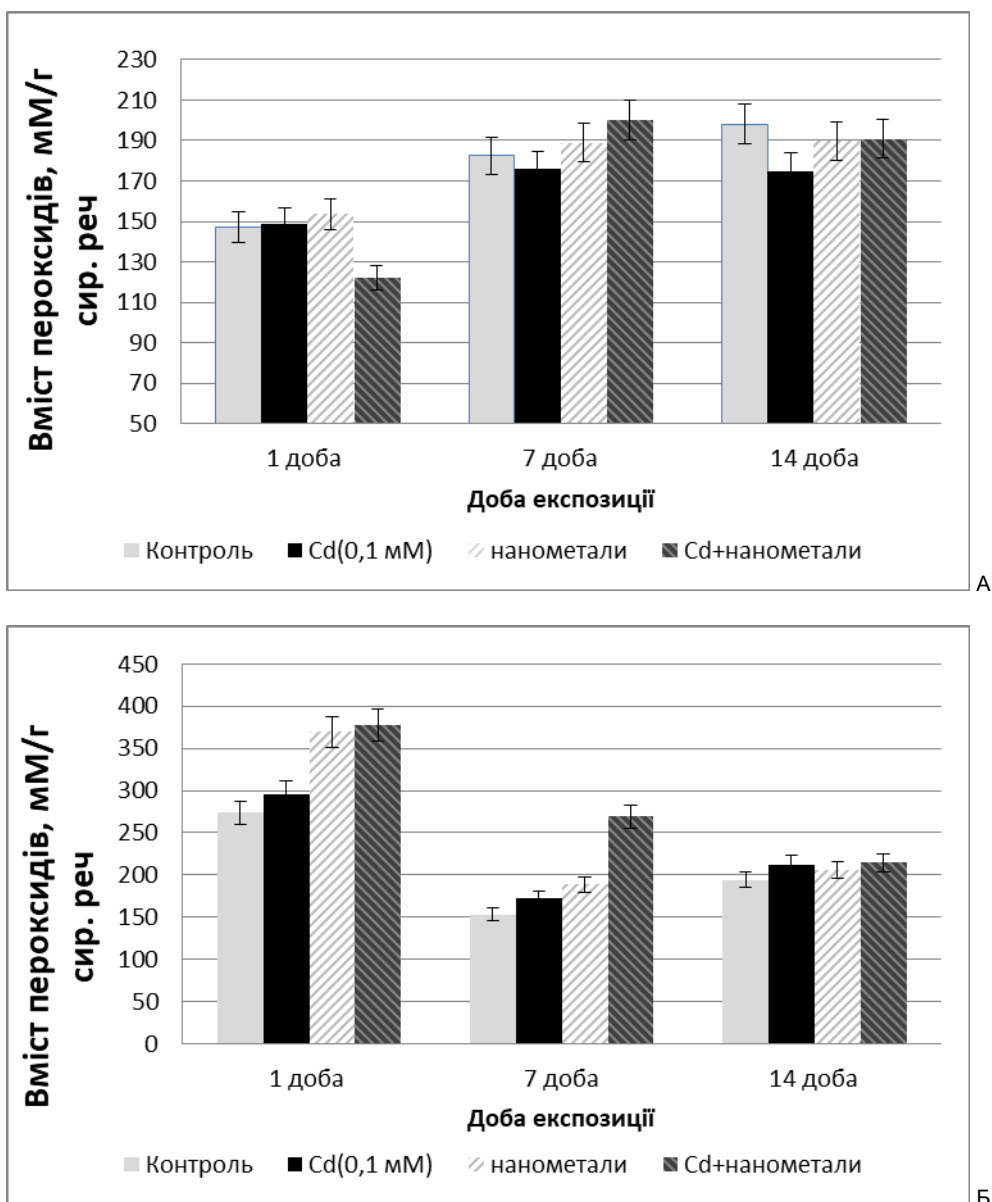


Рис. 1. Уміст пероксидів у листках салату сорту Лоло (А) та Лоло Росса (Б) за окремої та сумісної дії Cd^{2+} і суміші наночасток металів

Вплив наночастинок на накопичення первинних продуктів ПОЛ у дослідних зразках сорту Лоло Росса (рис. 1, Б) виявлявся максимально (на 35 та 38 % відповідно) у першій добі експозиції із подальшим порівнюванням із контролем. У варіанті впливу іонів кадмію не зафіксовано достовірних змін рівня пероксидів.

За отриманими даними щодо вмісту вторинних продуктів ПОЛ у листках дослідних рослин салату сорту Лоло (рис. 2, А) встановлено значне зростання параметра для більшості варіантів обробки упродовж експозиції.

Вплив іонів кадмію призводив до зростання накопичення МДА як за окремої, так і сумісної дії з наночастиками есенціальних металів. Для всіх варіантів обробки зафіксовано максимальне зростання рівня МДА на сьому добу експозиції (на 78, 54 та 73 % відповідно), проте на відміну від дії іонів кадмію, застосування наночастинок призводило до поступового зниження вмісту даного продукту пероксидації впродовж 14-добової експозиції.

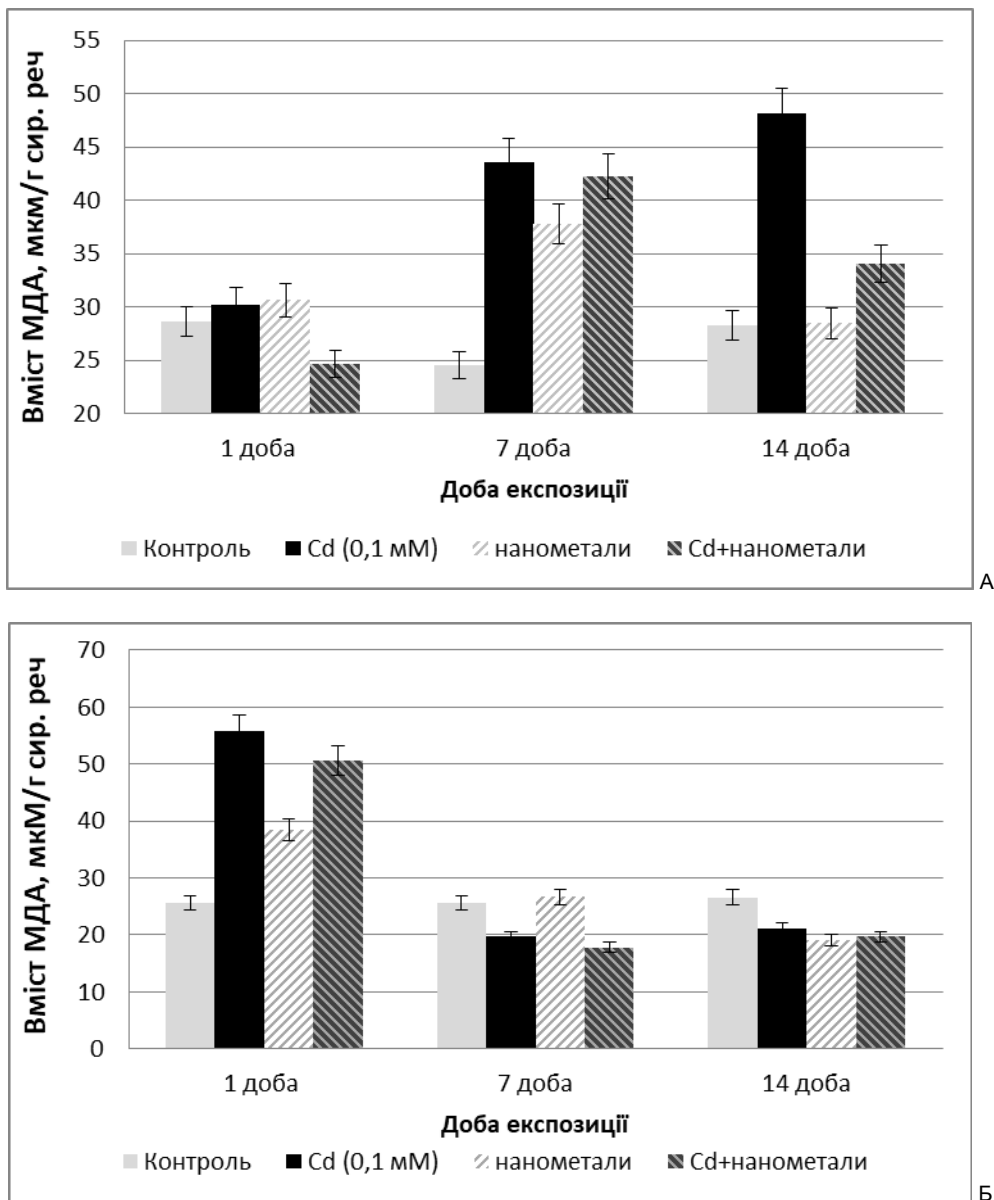


Рис. 2. Уміст ТБК-активних продуктів (МДА) у листках салату сорту Лоло (А) і Лоло Росса (Б) за окремої та сумісної дії Cd^{2+} і суміші наночастинок металів

Зазначимо, що досліджувані неіонні колоїдні розчини наночастинок есенціальних металів здатні виконувати функцію антиоксидантів, відповідно знижуючи рівень накопичення ТБК-активних продуктів ліпопероксидації [12]. Вплив усіх варіантів обробки на накопичення вторинних продуктів ПОЛ у дослідних зразках сорту Лоло Росса (рис. 2, Б) виявлявся у зростанні вмісту МДА на першу добу експозиції (зростання вдвічі у варіантах дії

Cd^{2+} , на 50 % у варіанті нанообробки) із подальшим зниженням до 14-тої доби.

Упродовж експозиції нами було відмічено протилежність рівнів накопичення первинних і вторинних продуктів ліпопероксидації для обох сортів. Висока дивергентність значень МДА для сорту Лоло свідчить про знижену здатність до детоксикації шкідливих наслідків підвищеного рівня АФК у рослинних клітинах, порівняно із сортом Росса.

Значення вмісту пластидних пігментів та їхнє співвідношення – біомаркерні параметри, що характеризують адаптивний стан рослинного організму в умовах негативного впливу факторів середовища. Значне зниження показників вмісту хлорофілу *a* та *b* за умов обробки наночастками металів установлено для сорту Лоло

(рис. 3). У варіанті обробки Cd^{2+} упродовж експозиції не виявлено статистично достовірних відхилень значень даних показників, у варіантах впливу наночасток спостерігалось зрівняння із контрольними значеннями обох досліджуваних параметрів.

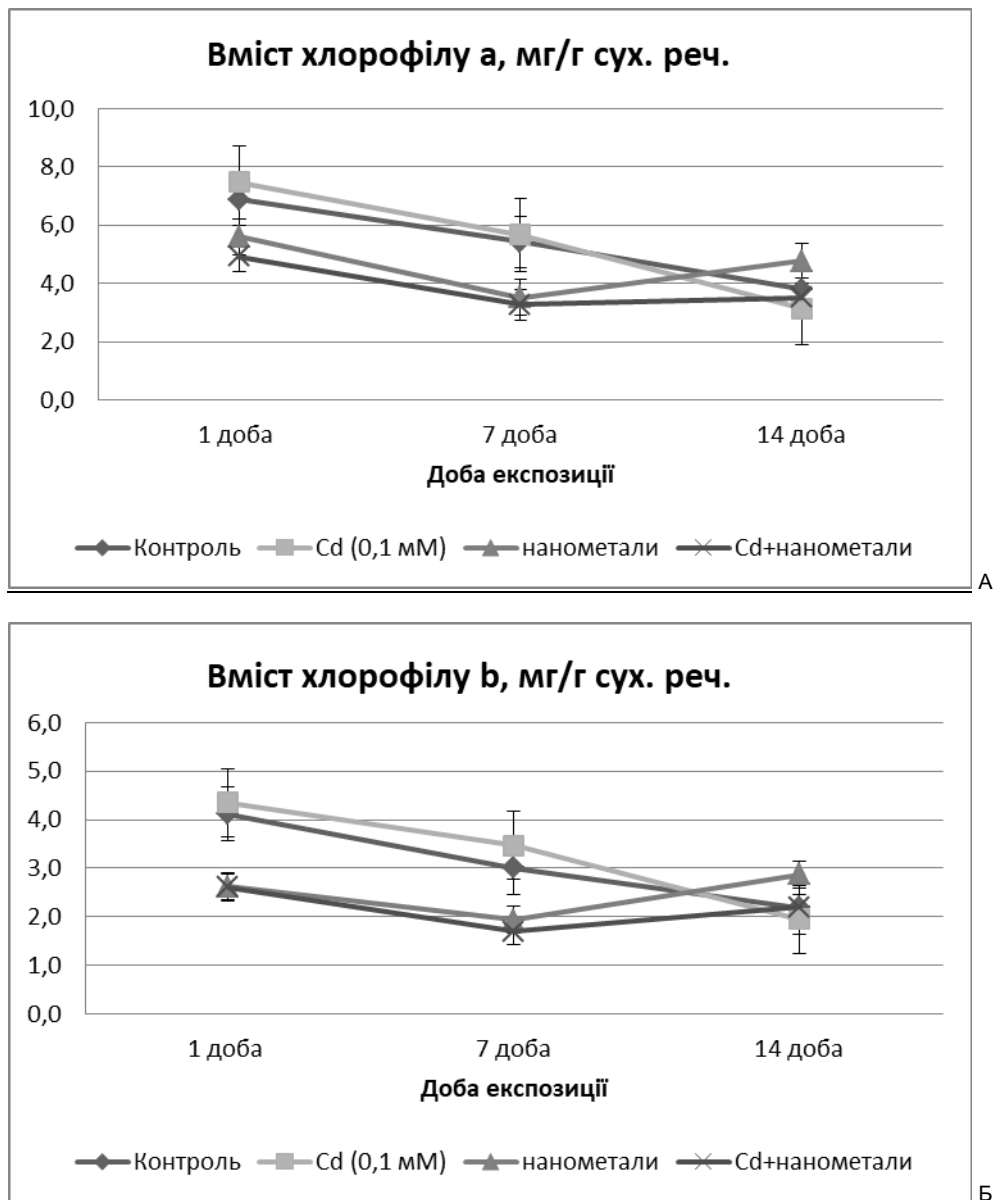


Рис. 3. Уміст фотосинтетичних пігментів – хлорофілів а (А) та b (Б) у зразках сорту Лоло за окремої та сумісної дії Cd^{2+} і суміші наночасток металів

Для сорту Лоло Росса зафіксовано достовірне дво-, трикратне зниження вмісту пластидних пігментів упродовж експозиції (рис. 4). У варіантах обробки сумішшю

наночасток біологічно активних металів стимулюючого ефекту виявлено не було.

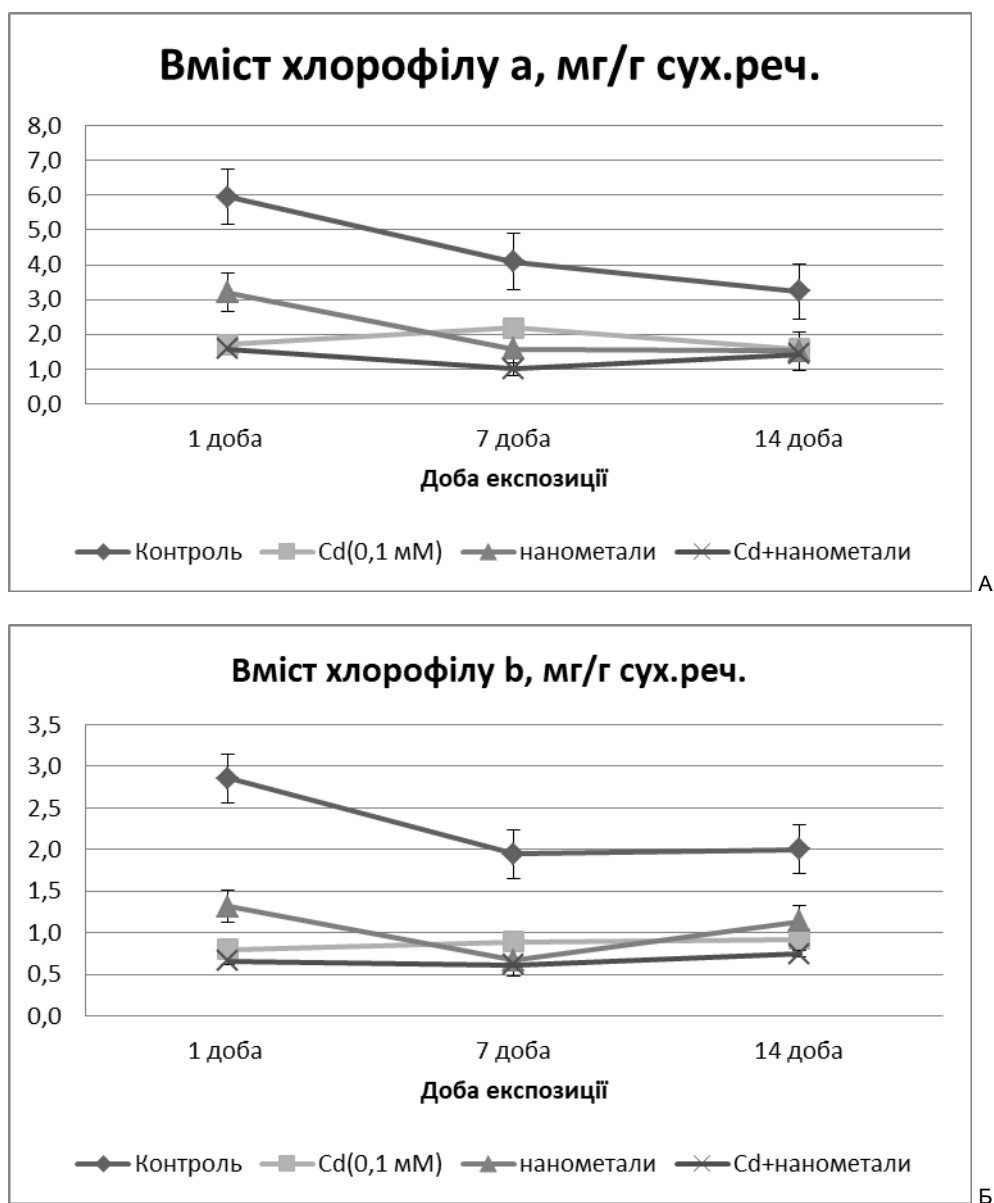


Рис. 4. Уміст фотосинтетичних пігментів – хлорофілів а (А) та b (Б) у зразках сорту Лоло Росса за окремої та сумісної дії Cd^{2+} і суміші наночасток металів

Очевидно додаткова обробка сумішшю есенціальних нанометалів стимулює адитивне стресове навантаження на маркери стійкості фотосинтетичного апарату рослин сорту Росса в умовах шкідливої дії кадмію, що виявляється у зниженні вмісту основних пластидних пігментів та, як наслідок, – зниженні продуктивності в цілому.

Каротиноїди виступають скавенджерами АФК у пластидах, а отже являють собою неферментативну ланку антиоксидантного захисту фотосинтетичного апарату в умовах екологічного стресу. Станом на сьогодні існують доволі суперечливі дані щодо впливу наночасток металів на фотосинтетичний апарат у цілому. На думку Мосензаде зі співавторами [13], обробка наночастками цинку призводила до зростання вмісту каротиноїдів у рослин *Rosmarinus officinalis*, на фоні зниження вмісту хлорофілів а та b. У дослідженнях Карімі [3] повідомляється про токсичну дію наночасток металів на рівень основних пластидних пігментів та рівень ПОЛ, що вияв-

лялось у зниженні як вмісту хлорофілів, так і каротиноїдних антиоксидантів та зростанні ТБК-активних продуктів у рослин *Triticum aestivum*.

Відповідно до отриманих даних, зміни інтенсивності прооксидантних процесів у рослин салату також призводять до зменшення вмісту каротиноїдів, що є компонентом антиоксидантної системи рослин. Зниження рівня каротиноїдів зафіксовано у всіх варіантах обробки з високим ступенем вияву в сорту Лоло Росса (рис. 5, Б). Уміст пулу каротиноїдів у сорту Росса залишався стабільно зниженим упродовж експозиції з максимумом інгібування для Cd^{2+} у першу добу (до 60 %), для варіанту $\text{Cd}^{2+} + (\text{Cu}, \text{Zn}, \text{Mn}, \text{Fe})$ -нанометали на сьому добу (до 70 %). Для зразків сорту Лоло (рис. 5, А) характерно зниження вмісту каротиноїдів у варіантах Cd^{2+} -експозиції на 14-ту добу (на 38 %) та за адитивного впливу колоїдного розчину наночасток металів на сьому добу (на 37 %).

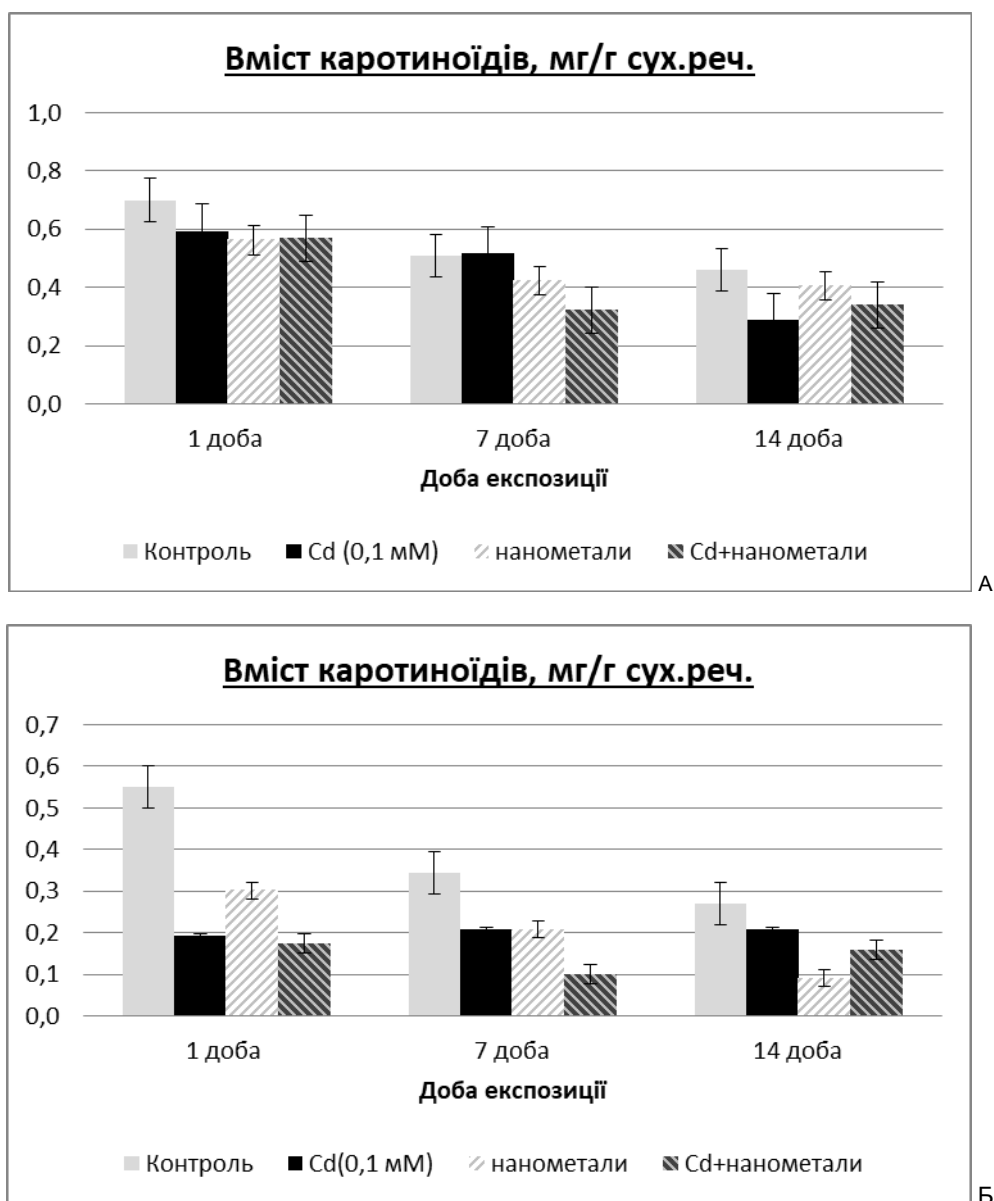


Рис. 5. Уміст каротиноїдів у листках рослин сорту Лоло (А) і Лоло Росса (Б) за окремої та сумісної дії Cd^{2+} і суміші наночасток металів

Оскільки до суміші неіонного колоїдного розчину наночасток входять Cu та Zn, які відносять до важких металів [14], існує вірогідність їх більш вираженого негативного і пролонгованого впливу на компоненти фотосинтетичного апарату росли, що зафіксовано у зниженні вмісту основних фотосинтетичних пігментів листках салату обох сортів за передпосівної обробки.

Співвідношення вмісту фотосинтетичних пігментів (хлорофіл *a*/хлорофіл *b*) використовують для характе-

ристики активності світло-збиральних комплексів (СЗК) фотосистем (ФС) [9]; хлорофіл *a* є компонентом корових комплексів та периферичних антен обох ФС, хлорофіл *b* входить до складу протеїнасоційованих пігментних СЗК, тому зміни у співвідношеннях цих фотосинтетичних структур свідчать, зокрема, про порушення зв'язків між реакційними центрами ФС і СЗК та вважаються біомаркером фізіологічного стану рослини за екологічного стресу [7; 15].

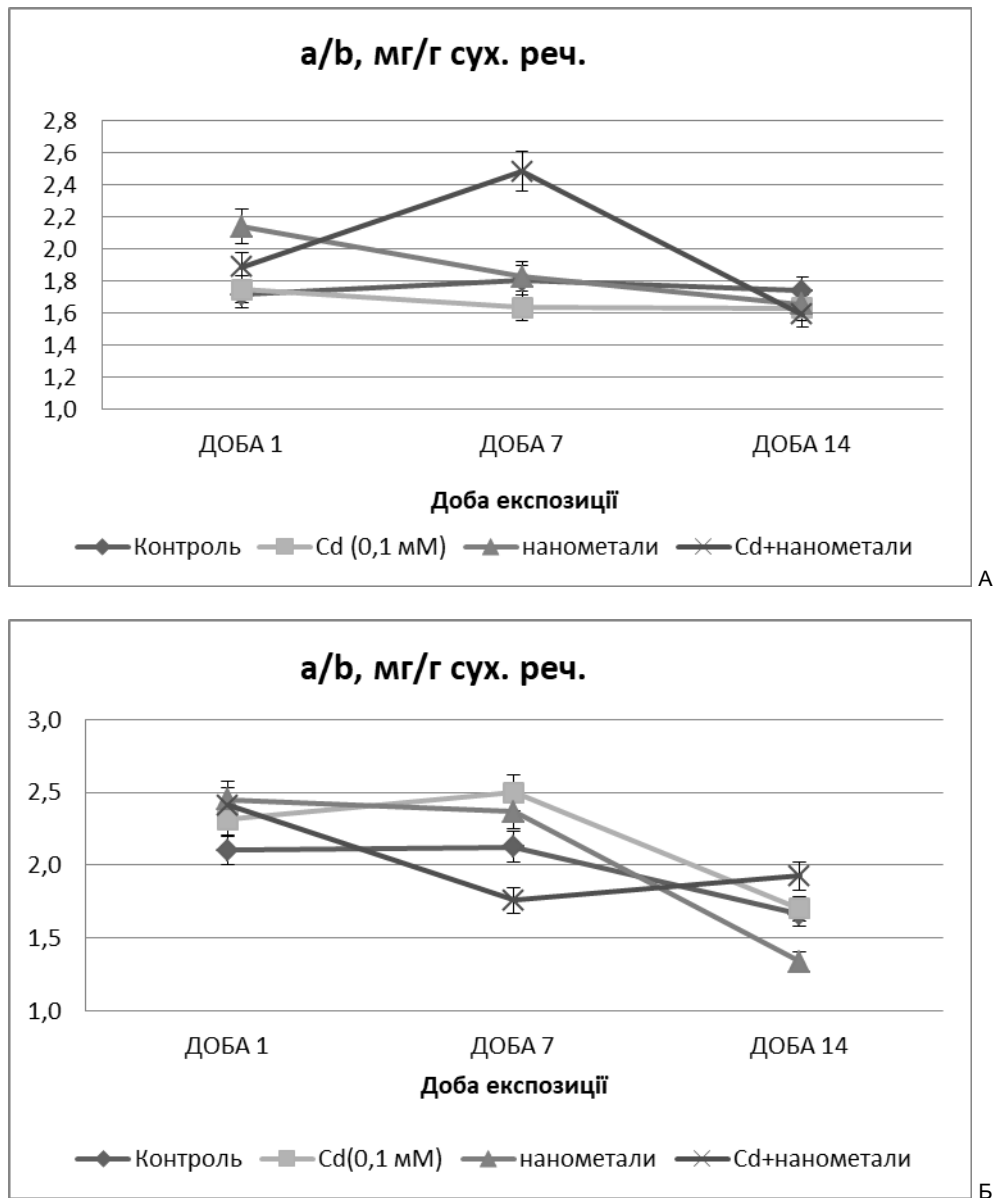


Рис. 6. Відношення вмісту хлорофілу а до хлорофілу b у листках салату сортів Лоло (А) та Лоло Росса (Б) за окремої та сумісної дії Cd^{2+} і суміші наночасток металів

Отримані нами результати достовірно вказують на зростання параметра a/b у зразках сорту Лоло (рис. 6, А) за дії наночасток на першу та сьому добу експозиції (максимум зростання на 38 % відмічено у варіанті сумісного впливу наночасток та кадмію на сьому добу). У рослин сорту Росса спостерігали значну дивергенцію отриманих результатів за різних типів обробки (рис. 6, Б), а також протилежну до сорту Лоло тенденцію співвідношення a/b у варіантах кадмієвого навантаження. Сьома доба експозиції виявилась критичною для даного сорту, що відображено у зростанні параметра a/b для Cd^{2+} -впливу (на 19 % із подальшим вирівнюванням до контрольних значень) та мінімальному для варіанта сумісної обробки (на 20 % із подальшим зростанням на 18 %).

Співвідношення хлорофілу a/b позитивно корелює із співвідношенням реакційних центрів ФСII до СЗКII. Вона містить більшу частину хлорофілу b , а, отже, має нижчий показник a/b , ніж інші протеїн-асоційовані комплекси ФСII [9; 16]. Існують суперечливі літературні дані щодо наслідків подібних змін [7], оскільки відомо, що різні типи стресових факторів здатні призводити до мінливості даного показника. За його зниження спостері-

гається найменший вміст хлорофілу в гранах хлоропластів. При підвищенні – зменшується ступінь агрегації тилакоїдів пластидних мембран. Значне підвищення параметра a/b є проявом негативного кадмієвого та сумісного впливу досліджуваних факторів у обох сортах салату, із більш вираженим ефектом – у зразках сорту Росса. Згідно з результатами наших попередніх досліджень, зменшення вмісту продуктів ліпопероксидації на фоні зниження основних біомаркерів фізіологічного стану рослин Росса може свідчити про високу активність додаткових антиоксидантних систем ензиматичної та неензиматичної природи [17].

Висновки. Отримані дані дають підставу стверджувати, що показники вмісту ТБК-активних продуктів та фотосинтетичних пігментів можна використовувати для біоіндикації стану агросистем закритих ґрунтів.

У всіх варіантах зеленого салату сорту Лоло нами не було відмічено достовірної різниці у рівні пероксидів, однак зазначено зростання рівня МДА упродовж експозиції. У сорту Росса із високим умістом антоціанів дану різницю помітно лише за обробки наночастками біологічно активних металів. Додаткова обробка сумішшю

есенціальних нанометалів виявлялась у рослинному організмі адитивним стресом, що і зумовило зниження вмісту основних пігментних біомаркерів в обох сортах.

Отримані дані є теоретичною основою методичних рекомендацій щодо регуляції вмісту біологічно активних сполук у листках салату та використання нанодобрих в умовах закритого ґрунту сучасних вертикальних урбо-городів. А також є корисними для практики тепличних господарств у дослідженні впливу наночасток есенціальних металів за умов техногенного навантаження.

Список використаної літератури:

- Trace metals in phosphate fertilizers used in Eastern Mediterranean countries / V. Azzi, V. Kazpard, B. Lartiges, et al. // *Clean Air Soil Water*. – 2017. – № 45. – Forthcoming.
- Nanomaterials as Promoters of Nutraceutical Quality in Crop Plants / A. Juárez-Maldonado, S. González-Morales, Cabrera-De la Fuente M. et al. // *Impact of Nanoscience in the Food Industry*. – 2018. – С. 277–310.
- Karimi J. Physiological Effects of Silver Nanoparticles and Silver Nitrate Toxicity in Triticum aestivum / J. Karimi, S. Mohsenzadeh // *Iranian Journal of Science and Technology*. – 2017. – № 41. – С. 111–120.
- Phytotoxicity of Colloidal Solutions of Metal-Containing Nanoparticles / Ye. O. Konotop, M. S. Kovalenko, V. Z. Ulynets et al. // *Cytology and Genetics*. – 2014. – № 48. – С. 37–42.
- Вплив неіонного колоїдного розчину наночасток металів на ріст і розвиток озимої пшениці / В. В. Франтичук, М. С. Коваленко, Л. М. Гончар та ін. // 36. наук. пр. Інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків. – 2012. – № 14. – С. 119–123.
- Liu R. Effects of Stabilized Nanoparticles of Copper, Zinc, Manganese, and Iron Oxides in Low Concentrations on Lettuce (*Lactuca sativa*) Seed Germination: Nanotoxicants or Nanonutrients? / R. Liu, H. Zhang, R. Lal // *Water Air Soil Pollut*. – 2016. – № 227. – С. 42 (14).
- Стимулююча дія низьких концентрацій алюмінію на фізіологічний стан рослин грецької татарської (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) / О. Є. Смірнов, Н. Ю. Таран, А. М. Косян та ін. // Вісн. Харківськ. нац. ун-ту імені В. Н. Каразіна. Серія: Біологія. – 2014. – № 23. – С. 107–116.
- Спосіб отримання неіонного колоїдного розчину металів / К. Г. Лопатко, Є. Г. Афтанділіянц, С. М. Каленська, О. Л. Тонха // Патент на винахід № 38459 від 12.01.2009.
- Impact of Metal Nanoform Colloidal Solution on the Adaptive Potential of Plants / N. Taran, L. Batsmanova, M. Kovalenko et al. // *Nanoscale Res Lett*. – 2016. – № 11. – С. 89 (12).
- Мусієнко М. Спектрофотометричні методи в практиці фізіології, біохімії та екології рослин / М. М. Мусієнко, Т. В. Паршикова, П. С. Славний. – К.: Фітосоціоцентр, 2001. – 200 с.
- Бацманова Л. Скринінг адаптивного потенціалу рослин за показниками оксидного стресу / Л. М. Бацманова, Н. Ю. Таран. – К.: ТОВ "Видавництво Авега", 2010. – 79 с.
- Таран Н. Використання наночасток металів у технологіях вирощування зернових культур / Н. Ю. Таран, Л. М. Бацманова, В. П. Каленський та ін. – К.: ТОВ "Видавництво Авега", 2012. – 73 с.
- Mohsenzadeh S. Zinc Sulphate and Nano-Zinc Oxide Effects on Some Physiological Parameters of Rosmarinus officinalis / S. Mohsenzadeh, S. S. Moosavian // *American Journal of Plant Sciences*. – 2017. – № 8. – С. 2635-2649.; doi: [10.4236/ajps.2017.811178].
- The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review / A. Khan, S. Khan, M. A. Khan et al. // *Environ Sci Pollut Res*. – 2015. – № 22. – С. 13772 (15); doi: [10.1007/s11356-015-4881-0].
- Еремченко О. З. Содержание пигментов в растениях *Lepidium sativum* в условиях хлоридно-натриевого засоления и ошкелачивания / О. З. Еремченко, М. Г. Кусакина, Е. В. Лузина // *Вестн. Пермского ун-та. Серия: Биология*. – 2014. – № 1. – С. 30–37.
- Green B. The chlorophyll-carotenoid proteins of oxygenic photosynthesis / B. R. Green, D. G. Durnford // *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*. – 1996. – № 47. – С. 685–714.
- Phenylalanine ammonia-lyase activity and anthocyanin content in different varieties of lettuce under the cadmium influence / O. I. Kosyk,

I. M. Khomenko, L. M. Batsmanova et al. // *The Ukrainian Biochemical Journal*. – 2017. – №89 (2). – С. 85–91.

References (Scopus)

- Azzi V., Kazpard V., Lartiges B. et al. Trace metals in phosphate fertilizers used in Eastern Mediterranean countries. *Clean Air Soil Water*. 2017 Jan 13;45(1). Epub Sept 2016. doi:10.1002/clen.201500988.
- Juárez-Maldonado A., González-Morales S., Cabrera-De la Fuente M. et al. Nanometals as Promoters of Nutraceutical Quality in Crop Plants. *Impact of Nanoscience in the Food Industry*. 2018;277-310. doi:10.1016/B978-0-12-811441-4.00010-8.
- Karimi J, Mohsenzadeh S. Physiological Effects of Silver Nanoparticles and Silver Nitrate Toxicity in Triticum aestivum. *Iranian Journal of Science and Technology*. 2017;41(1):111–120. doi:10.1007/s40995-017-0200-6.
- Konotop Ye., Kovalenko M., Ulynets V. et al. Phytotoxicity of Colloidal Solutions of Metal-Containing Nanoparticles. *Cytology and Genetics*. 2014;48(2):37–42.
- Frantiichuk V., Kovalenko M., Honchar L. et al. Vplyv neionnoho koloidnoho rozchynu nanochastok metaliv na rist i rozvytok ozymoi pshenytsi. *Zbirnyk naukovykh prats [Institute of bioenergetical cultures and tsukrovkyh buriakiv]*. 2012;14:119-123. Ukrainian.
- Liu R., Zhang H., Lal R. Effects of Stabilized Nanoparticles of Copper, Zinc, Manganese, and Iron Oxides in Low Concentrations on Lettuce (*Lactuca sativa*) Seed Germination: Nanotoxicants or Nanonutrients? *Water Air Soil Pollut*. 2016;227:42. doi:10.1007/s11270-015-2738-2.
- Smirnov OE, Taran NYu, Kosyan AM, et al. Challenging action of low-dose aluminium on physiological condition of Tartary Buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) plants. *The Journal of V.N.Karazin Kharkiv National University. Series: biology*. 2014;23:107-116. Ukrainian.
- Lopatko K., Aftandilians Ye., Kalenska S., Tonkha O. Sposib otrymania neionnoho koloidnoho rozchynu metaliv. Patent №38459; 12.01.2009. Ukrainian.
- Taran N., Batsmanova L., Kovalenko M. et al. Impact of Metal Nanoform Colloidal Solution on the Adaptive Potential of Plants. *Nanoscale Res Lett*. 2016;11:89. doi:10.1186/s11671-016-1294-z.
- Musienko M. Spektrofotometrični metody v praktitsi fiziologii, biokhimii ta ekologii roslin / MM Musienko, TV Parshykova, PS Slavyi. K.: Fitosotsiotsentr; 2001. 200 p. Ukrainian.
- Batsmanova L., Taran N. Skryninh adaptivnoho potentsialu roslin za pokaznykamy oksydnoho stresu. K.: TOV "Vydavnytstvo Aveha"; 2010. 79 p. Ukrainian.
- Taran N., Batsmanova L., Kalenskyi V. et al. Vykorystannia nanochastok metaliv u tekhnologiiakh vyroshchuvannia zernovykh kultur. K.: TOV "Vydavnytstvo Aveha"; 2012. Ukrainian.
- Mohsenzadeh S., Moosavian S. Zinc Sulphate and Nano-Zinc Oxide Effects on Some Physiological Parameters of Rosmarinus officinalis. *American Journal of Plant Sciences*. 2017;8:2635-2649. doi:10.4236/ajps.2017.811178.
- Khan A., Khan S., Khan M. et al. The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review. *Environ Sci Pollut Res*. 2015;22:13772. doi:10.1007/s11356-015-4881-0.
- Eremchenko O., Kusakyna M., Luzyna E. Soderzhanye pyhmentov v rastenyakh *Lepidium sativum* v usloviyakh khloridno-natryevoho zasoleniya y oshchelachyvania. *Vestnyk Permskoho unyversyteta. Seryia: Byolohiya*. 2014;1:30-37. Russian.
- Green B., Durnford D. The chlorophyll-carotenoid proteins of oxygenic photosynthesis. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*. 1996;47:685-714.
- Kosyk O., Khomenko I., Batsmanova L. et al. Phenylalanine ammonia-lyase activity and anthocyanin content in different varieties of lettuce under the cadmium influence. *The Ukrainian Biochemical Journal*. 2017;89(2):85-91. doi:10.15407/ubj89.02.085.

Надійшла до редколегії 02.04.2018

Отримано виправлений варіант 10.05.2018

Підписано до друку 10.05.2018

Received in the editorial 02.04.2018

Received a revised version on 10.05.2018

Signed in the press on 10.05.2018

И. Хоменко, асп., О. Косык, канд. биол. наук, Н. Таран, д-р биол. наук
УНЦ "Институт биологии и медицины",
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина

ВЛИЯНИЕ ИОНОВ КАДМИЯ И ЭСЕНЦИАЛЬНЫХ НАНОМЕТАЛЛОВ НА ФИЗИОЛОГО-БИОХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ САЛАТА ПОСЕВНОГО

Согласно цели работы исследовано влияние предпосевной обработки неионным коллоидным раствором смеси наночастиц металлов меди, цинка, марганца и железа, ионов кадмия и их совместного действия на показатели содержания продуктов перекисного окисления липидов и баланса фотосинтетических пигментов в растениях *Lactuca sativa* L. двух сортов с различным содержанием антоциановых пигментов (Лоло и Лоло Росса). Было использовано спектрофотометрические методы исследования содержания пероксидов, тиобарбитурат-активных продуктов по модифицированной методике Кумар и Ноулс, а также содержание основных пластидных пигментов (хлорофиллов а, в, соотношение а / в, а также пула каториноидов) по расчетным формулам Винтерманс, де Мотс. В результате установлено снижение содержания пероксидов и увеличение малонового диальдегида у большинства вариантов обработки сорта Лоло. Противоположную тенденцию наблюдали для сорта Росса (начальный прирост данных параметров при обработке наночастицами металлов снижался до уровня контрольных значений в течение 14-дневной экспозиции). У сорта Лоло под влиянием наночастиц наблюдали снижение содержания хлорофиллов, в отличие от действия кадмия. Для Росса зафиксировано значите-

льное падение содержания, как хлорофиллов, так и каротиноидов во всех вариантах обработки в течение экспозиции. Показатель a/b для растений Лоло достоверно возрастал у вариантах кадмиевого влияния, для Росса отмечено разнонаправленность влияния всех вариантов обработки. В итоге выявлено, что обработка смесью эссенциальных нанометаллов проявляла функции аддитивной стресс-нагрузки, что отражалось в росте уровня продуктов липопероксидации и снижении основных пигментных биомаркеров в обоих сортах в течение экспозиции в растворе 0,1 ммоль кадмия. Сорт Лоло Росса проявил более высокую дивергентность результатов при различных системах обработки по сравнению с сортом Лоло.

Ключевые слова: наночастицы эссенциальных металлов, продукты липопероксидации, пигментный комплекс, *Lactuca sativa* L.

I. Khomenko, PhD stud., O. Kosyk, Associate Professor, N. Taran, Dr. Sc.

ESC "Institute of Biology and Medicine",

Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

THE INFLUENCE OF CADMIUM AND ESSENTIAL NANOMETALS ON THE PHYSIOLOGICAL AND BIOCHEMICAL PARAMETERS OF LETTUCE PLANTS

Due to the aim the effect of pre-sowing treatment with a nonionic colloidal solution of the mix of copper, zinc, manganese and iron nanoparticles, cadmium ions and their combined action on the physiological and biochemical indices: the content of lipid peroxidation products and balance of photosynthetic pigments in green Lolo and red Lolo Ross varieties of *Lactuca sativa* L. was investigated. Spectrophotometric methods of investigating the content of peroxides, thiobarbiturate-active products (with use of the modified Kumar and Knowles method), as well as the content of the main photosynthetic pigments (chlorophyll a , b , a/b ratio, and the carotenoid content) with the Wintermans, de Mots calculations application were used. Due to the results, a decrease in the content of peroxides and growth of malonic dialdehyde was observed for most treatment variants of Lolo. The opposite tendency was observed for the Ross variety (the initial growth of these parameters under the nanoparticles influence decreased to the control during the fourteen-day exposure). The decrease of chlorophyll content was observed in the Lolo variety under the essential metal nanoparticles influence, in contrast to the action of cadmium. For the Ross variety, a significant reduction of both chlorophyll and carotenoid contents in all treatment types during exposure was calculated. The a/b -index for Lolo plants has significantly increased in variants of cadmium influence, for Ross plants the divergence of the influence of all treatment variants has been marked. As a result, the treatment with a mixture of essential nanometals showed additive stress-loading functions. It was observed in a growth of the level of lipid peroxidation products and the reduction of the photosynthetic pigment biomarkers in both varieties during the 0,1 mM cadmium exposure. The Lolo Ross variety showed a higher variability of results under different treatment, compared to the Lolo variety.

Key words: nanoparticles of essential metals, lipoperoxidation products, pigment complex, *Lactuca sativa* L.

УДК 574.583

З. Бур'ян, асп., В. Гандзюра, д-р біол. наук, В. Трохимець, д-р біол. наук
ННЦ "Інститут біології і медицини",

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНА ОРГАНІЗАЦІЯ УГРУПОВАНЬ ЛІТОРАЛЬНОГО ЗООПЛАНКТОНУ ВЕРХІВ'Я КРЕМЕНЧУЦЬКОГО ВОДОСХОВИЩА В РАЙОНІ КАНІВСЬКОГО ПРИРОДНОГО ЗАПОВІДНИКА

Подано результати дослідження структурно-функціональної організації угруповань літорального зоопланктону у верхів'ї Кременчуцького водосховища в межах Канівського природного заповідника за літній період 2015 р. Видове багатство було представлено 34 видами моногонимних коловертів, гіллястовусів та веслоногих ракоподібних. За таксономічним складом переважали представники ротаторно-кладоцерного комплексу. Виявлено, що видовий склад угруповань літорального зоопланктону в межах різних біотопів шести дослідних станцій за індексом схожості Жаккара характеризувався невисокою подібністю – $J = 7,1-28,6$. Пояснити це можна тим, що у літній період сформувалися складні форми вищих водних рослин. Це призводить до утворення специфічних угруповань зоопланктону в зарослих біотопах. Літоральний зоопланктон характеризувався переважанням фітофільної групи серед різноманітності екологічних типів живлення: фітофільна – 18 видів (53,0 %) із 34. За типом живлення найбільшу частку становили мирні представники зоопланктону – 73,3 % (25 видів). Кількісні показники (щільність і біомаса) в обох біотопах були "дуже низькі": зарослий – 4077 ± 2098 екз./м³ і $0,07 \pm 0,04$ г/м³; чистоводдя – 4123 ± 3929 екз./м³ і $0,054 \pm 0,038$ г/м³. Серед більшості дослідних станцій за кількісними показниками переважали представники веслоногих ракоподібних, що пов'язано з масовим розвитком їх личинкових стадій (*Nauplia*, *Calanoidajuv.*, *Cyclopoidajuv.*) у літній період.

Ключові слова: Літоральний зоопланктон, структурно-функціональна організація, Кременчуцьке водосховище, Україна.

Вступ. Літоральний зоопланктон є унікальним угрупованням гідробіонтів прибережних гідробіоценозів, динаміка структурно-функціональної організації якого є показником трансформації екосистем водосховищ [1]. Також зоопланктон становить основу кормової бази молоді риб та риб-планктофагів у різноманітних водоймах [2–3]. Найбільш удалим періодом для проведення аналізу структурно-функціональної організації угруповань літорального зоопланктону є літній період, тому що саме цей час характеризується оптимальними умовами для його розвитку [4–6]. Оскільки антропогенне навантаження призводить до змін умов середовища існування гідробіонтів, то це відображається і на змінах у трофічних мережах [7]. Щорічний моніторинг зоопланктону дає можливість відслідкувати сучасний стан водних екосистем, а в подальшому виявити специфіку їхньої багаторічної динаміки. Літоральний зоопланктон верхів'я Кременчуцького водосховища, що межує із Канівським природним заповідником, не вивчали протягом останніх років [7–8]. Тому сучасні дослідження структурно-функціональної організації угруповань літо-

рального зоопланктону евтрофного Кременчуцького водосховища є необхідними для розуміння процесів, які відбуваються як у власне угрупованні, так і в даній екосистемі в цілому. Зважаючи на це, метою нашої роботи було здійснити аналіз структурно-функціональної організації угруповань літорального зоопланктону даної екосистеми в літній період 2015 р.

Матеріали і методи. Об'єктами дослідження були угруповання літорального зоопланктону. До їхнього складу входять три основні групи зоопланктону: коловертів (клас Eurotatoria), Гіллястовусі ракоподібні (клас Branchiopoda, ряд Cladocera), різні вікові стадії розвитку веслоногих ракоподібних (клас Соперода), черепашкові ракоподібні (клас Ostracoda) і личинки двостулкових молюсків (клас Bivalvia).

Матеріал збирали протягом світлої частини доби влітку (із 23 червня по 5 липня) 2015 р. у межах шести дослідних станцій верхів'я Кременчуцького водосховища в районі Канівського природного заповідника: I – N 49°43.854' E 31°31.360', II – N 49°43.496' E 31°32.130', III – N 49°44.269' E 31°31.508', IV – N 49°44.296'