ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ ЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ПРООКСИДАНТНО-АНТИОКСИДАНТНОЇ СИСТЕМИ В ТКАНИНАХ *ELODEA CANADENSIS* ПІД ВПЛИВОМ ПОЛЮТАНТІВ ГІДРОСФЕРИ

Боброва М.С.¹, Голодаєва О.А.², Коваль С.Ю.³, Мовчан С.В.¹

¹Центральноукраїнський державний педагогічний університет
імені Володимира Винниченка

вул. Шевченка, 1, 25006, м. Кропивницький
kazna4eeva@gmail.com, serg.movchan015@gmail.com;

²Київський міжнародний університет
вул. Львівська, 49, 03179, м. Київ

elena.gologaeva@gmail.com;

³Міжнародний європейський університет
пр. Академіка Глушкова, 42, 03187, м. Київ

kovalsyu@gmail.com

У статті здійснено порівняльний аналіз впливу поллютантів гідросфери на рівень вільнорадикального перекисного окиснення макромолекул та вміст ферментних і низькомолекулярних антиоксидантів у тканинах *Eloдея canadensis* Rich. Розкрито біохімічне підґрунтя впливу щоразу більшої концентрації NO_3^- та Pb^{2+} -іонів на рослинний гомеостаз. Наголошено на значенні прооксидантно-антиоксидантної системи як індикатора впливу стресових факторів на організм. Підкреслена необхідність визначення змін прооксидантно-антиоксидантного потенціалу тканин рослин під впливом щоразу більшої концентрації поллютантів як для забезпечення рослинного гомеостазу, так і для моніторингу безпеки екологічного стану гідросфери. За допомогою експерименту досліджено вплив зміни показників прооксидантно-антиоксидантної системи у тканинах *Eloдея canadensis* залежно від зростання концентрації NO_3^- -іонів та Pb^{2+} -іонів. Рівень вільнорадикального перекисного окиснення ліпідів визначали за концентрацією малонового діальдегіду. Оцінку рівня антиоксидантного захисту здійснювали за активністю ферментних антиоксидантів (супероксиддисмутази та каталази) і за концентрацією низькомолекулярних (аскорбінової кислоти та глутатіону) антиоксидантів. За результатами експерименту визначено, що іони Pb^{2+} мають значно потужнішу прооксидантну активність, порівняно з NO_3^- ; каталаза є більш стійкою, порівняно із супероксиддисмутазою, до дій щоразу більшої концентрації NO_3^- та Pb^{2+} ; будь-яке підвищення концентрації Pb^{2+} призводить до стрімкого зниження активності супероксиддисмутази; глутатіон має потужніший антиоксидантний ефект і більш стійкий до зростання концентрації Pb^{2+} , порівняно з аскорбіновою кислотою; аскорбінова кислота проявляє більшу антиоксидантну дію і є стійкішою до зростання концентрації NO_3^- , порівняно з глутатіоном; низькомолекулярні антиоксиданти є більш стійкими до впливу щоразу більшої концентрації NO_3^- та Pb^{2+} , порівняно з ферментними. **Ключові слова:** поллютанти, прооксиданти, антиоксиданти, супероксиддисмутаза, каталаза, аскорбінова кислота, глутатіон, малоновий діальдегід.

Features of change of value of indicators of prooxidant-antioxidant system in *Eloдея canadensis* tissues under the influence of hydrosphere polyutants. Bobrova M., Holodaieva O., Koval S., Movchan S.

The article compares the effect of hydrosphere pollutants on the level of free radical peroxidation of macromolecules and the content of enzymatic and low molecular weight antioxidants in the tissues of *Eloдея canadensis* Rich. The biochemical basis of the influence of increasing concentration of NO_3^- and Pb^{2+} -ions on plant homeostasis is revealed. The importance of the prooxidant-antioxidant system (PAS) as an indicator of the impact of stress factors on the body is emphasized. The need to determine changes in the prooxidant-antioxidant potential of plant tissues under the influence of increasing concentrations of pollutants, both to ensure plant homeostasis and to monitor the safety of the ecological state of the hydrosphere. The effect of changes in PAS in *Eloдея canadensis* tissues depending on the increase in the concentration of NO_3^- and Pb^{2+} -ions was investigated experimentally. The level of free radical lipid peroxidation was determined by the concentration of malonic dialdehyde (MDA). The level of antioxidant protection was assessed by the activity of enzymatic antioxidants (superoxide dismutase (SOD) and catalase) and the concentration of low molecular weight (ascorbic acid (AK) and glutathione (GSH)) antioxidants. It has been experimentally determined that Pb^{2+} ions have much stronger prooxidant activity compared to NO_3^- ; catalase is more resistant than SOD to the effects of increasing concentrations of NO_3^- and Pb^{2+} ; any increase in the concentration of Pb^{2+} leads to a sharp decrease in the activity of SOD; GSH has a stronger antioxidant effect and is more resistant to increasing concentrations of Pb^{2+} , compared with AK; AK has a greater antioxidant effect and is more resistant to increasing concentrations of NO_3^- , compared with GSH; low molecular weight antioxidants are more resistant to increasing concentrations of NO_3^- and Pb^{2+} , compared to enzymatic antioxidants. **Key words:** pollutants, prooxidants, antioxidants, superoxide dismutase, catalase, ascorbic acid, glutathione, malonic dialdehyde.

Постановка проблеми. Проблема забруднення навколишнього середовища іонами важких металів входить до переліку глобальних екологічних проблем людства. Наразі гостро постає питання неконтрольованого використання нітратів як у сфері сільського господарства, так і в промисловості [1]. Відсутність інформації про те, що надлишок нітратів не лише компенсує транзитну форму азоту на збіднених ґрунтах, а й є причиною зниження врожайності рослин, призводить до загострення проблеми нерационального господарювання [2].

Метою дослідження є встановлення змін прооксидантно-антиоксидантного статусу в тканинах *Elodea canadensis* залежно від зростання концентрації NO_3^- -іонів та Pb^{2+} -іонів.

Актуальність дослідження. Потрапляння важких металів та нітрат-іонів з ґрунту в гідросферу збільшує рівень вже наявних у ній поллютантів та призводить до незворотного впливу на водні екосистеми [3]. Відсутність компромісного вирішення питань з нормування вмісту цих речовин веде до фатальних наслідків щодо впливу на здоров'я людини. За умов реальної неможливості повного припинення викидів сполук свинцю в біосферу, а також через неможливість кардинального припинення передозування нітратними добривами метою нашої роботи стало виявлення змін показників прооксидантно-антиоксидантної системи (далі – ПАС) гідрофітів під впливом щоразу більшої концентрації зазначених іонів.

Зв'язок авторського доробку з важливими науковими та практичними завданнями. Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання:

- 1) дослідити вплив концентрації іонів Pb^{2+} , що зростає, на стан прооксидантно-антиоксидантної рівноваги у тканинах *Elodea canadensis*;
- 2) дослідити вплив концентрації іонів NO_3^- , що зростає, на стан прооксидантно-антиоксидантного балансу в тканинах *Elodea canadensis*;
- 3) порівняти, який із поллютантів має найбільший вплив на зміну показників ПАС *Elodea canadensis*.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними ферментними антиоксидантами є супероксиддисмутаза (далі – СОД) та каталаза. СОД є першою лінією захисту від активних форм кисню (далі – АФО), що обриває ланцюг вільнорадикального перекисного окиснення (далі – ВРПО) ще на етапі ініціювання та прискорює дисмутацію O_2^- (індуктора інших АФО) в 10^4 рази [4]. Існує зв'язок між активністю СОД і каталази, оскільки СОД постачає субстрат для каталази, яка генерує кисень для клітини [5]. Відомі вільні та мембранозв'язані (резервні) форми ферменту, зниження активності останніх є ознакою розвитку патологічного процесу [6]. Представником низькомолекулярних антиоксидантів для постановки експерименту обрано аскорбінову кислоту (далі – АК), що зумовлено її

широким колом практичного застосування та належністю аскорбінової кислоти до групи обов'язкових метаболітів рослин, що відіграє важливу роль в процесах росту і розвитку клітин. АК є одним із основних низькомолекулярних антиоксидантів, імуностимулювальних агентів [6; 7]. Згідно з останніми даними АК відіграє важливу роль у ліквідації наслідків нітратних отруєнь. Глютатіон (далі – GSH) в рослинних клітинах має досить високий вміст (0,2–10 мМ) [8]. GSH є джерелом, резервуаром та транспортною формою відновленого сульфору, а також ключовим учасником процесів, пов'язаних із детоксикацією важких металів, ксенобіотиків та екскретних продуктів метаболізму [9; 10].

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Недослідженим залишається вплив щоразу більшої концентрації поллютантів гідросфери на зміну прооксидантно-антиоксидантної активності в тканинах рослин.

Новизна. У роботі вперше здійснено порівняльний аналіз впливу щоразу більшої концентрації NO_3^- та Pb^{2+} -іонів на рівень вільнорадикального перекисного окиснення макромолекул та вміст ферментних і низькомолекулярних антиоксидантів у тканинах *Elodea canadensis* Rich.

Методологічне або загальнонаукове значення. На основі проведених досліджень експериментально виявлено зміни біохімічного складу тканин рослин під впливом NO_3^- та Pb^{2+} -іонів, які слід враховувати у роботі з методиками виявлення прооксидантно-антиоксидантної активності в рослинних об'єктах. Результати, отримані під час виконання роботи, використовуються в наукових дослідженнях та в навчальному процесі ЦДПУ ім. В. Винниченка на курсах «Фізіологія рослин», «Біохімія», «Екологія».

Виклад основного матеріалу. Об'єктом дослідження обрано *Elodea canadensis* Rich, що є типовим представником водних екосистем. Контрольна група перебувала в лабораторних умовах, максимально наближених до природних. Для дослідних груп створили модельні середовища з підвищеним вмістом поллютантів. Контрольна група містила концентрацію досліджуваних іонів у межах гранично допустимої концентрації. Для експерименту використовували 4 дослідні групи для NO_3^- та 4 дослідні групи для Pb^{2+} зі щоразу збільшуваною концентрацією досліджуваних іонів в 2, 3, 5 та 10 разів, порівняно з ГДК. Тривалість експозиції становила 1 місяць.

Методи дослідження. Рівень ВРПО ліпідів визначали за концентрацією малонового діальдегіду (далі – МДА) [11]. Аналіз рівня МДА здійснювали в наступній послідовності: 0,5 г тканини гомогенізували в 4,5 см³ трис-буферного розчину (рН = 7,4). Для визначення фонових рівнів МДА (MDA_0) до 2 см³ відібраного гомогенату одразу додали розчин трихлороцтової кислоти (w = 30%) та центри-

фугували 30 хв. за 3000 об./хв. До 2 см³ центрифугату додали 3 см³ розчину тіобарбітурової кислоти ($w = 0,338\%$) з подальшим фотометруванням за 540 нм проти контролю, що не містив гомогенату. Для ініціації приросту рівня МДА (МДА_{1,5}) пробу попередньо інкубували 90 хв. (1,5 години, тому МДА_{1,5}) в прооксидантному ферум-аскорбінатному буфері, струшуючи кожні 20 хв. Подальший аналіз проводили аналогічно до визначення МДА₀. Розрахунки здійснювали за формулою: $C = E \cdot 240,4$, де C – концентрація МДА в мкмоль/кг; E – екстинкція; 240,4 – коефіцієнт, що враховує молярну екстинкцію і розведення. Величину приросту рівня МДА, що обернено пропорційна антиоксидантному запасу тканини, розраховували згідно з формулою: $\Delta\text{МДА} = |\text{МДА}_{1,5} - \text{МДА}_0| / \text{МДА}_0 \cdot 100\%$, де $\Delta\text{МДА}$ – приріст рівня МДА, виражений у відсотках; МДА₀, МДА_{1,5} – фоновий та стимульований МДА.

Оцінку рівня антиоксидантного захисту здійснювали за активністю ферментних та концентрацією неферментних антиоксидантів. Для визначення активності СОД 0,5 г тканини гомогенізували в 0,5 см³ води, через 10 хв. додали 2 см³ осаджувача пігментів (етанол – хлороформ 5:3), перемішали, витримали за -4⁰ С впродовж доби, потім центрифугували за 3000 об./хв. упродовж 15 хв. Контроль: у кювету (1 см) набрали 4,4 см³ карбонатного буферного розчину ($C = 0,2$ моль/дм³; $\text{pH} = 10,2$), 0,1 см³ дистильованої води та 0,5 см³ розчину адреналіну ($C = 0,01$ моль/дм³) в лимонній кислоті ($C = 0,01$ моль/дм³). Перемішали і відзначали екстинкцію кожну хвилину до припинення її збільшення. У дослідну пробу замість води ввели 0,1 см³ центрифугату. Розрахунок активності СОД здійснювали за формулою: $T = (E_1 - E_2) \cdot 100 / E_1$, де T – відсоток гальмування окислення •O₂⁻ адреналіну в адренохром (%); E_1 – середня екстинкція контролю за 1 хв. (E/t); E_2 – середня екстинкція досліді за 1 хв.; 100 – максимальний відсоток (%) гальмування. Активність СОД виражали в умовних одиницях (ОД): $\text{ОД} = T / (100 - t)$, де 1 ОД відповідає гальмуванню швидкості реакції на 50%.

Для визначення активності каталази 0,1 г тканини гомогенізували в 20 см³ дистильованої води. У колби набрали по 7 см³ дистильованої води, потім у дослідну пробу додали 1 см³ гомогенату, а в контрольну – 1 см³ прокип'яченого гомогенату. В обидві проби додали по 2 см³ H₂O₂ ($w = 1\%$), перемішали та залишили за кімнатної температури на 30 хв., струшуючи кожні 10 хв. Потім додали в обидві проби по 3 см³ H₂SO₄ ($w = 10\%$) і титрували KMnO₄ ($C(1/5\text{KMnO}_4) = 0,1$ моль/дм³) до появи блідо-рожевого забарвлення, що не зникло впродовж 30 с. Розрахунок активності каталази здійснювали за формулою: $A = (V_K - V_D) \cdot 1,7$, де A – каталазне число; V_K – об'єм розчину KMnO₄ ($C(1/5\text{KMnO}_4) = 0,1$ моль/дм³), витраченого на титрування контрольної проби, см³; V_D – об'єм розчину KMnO₄ ($C(1/5\text{KMnO}_4) =$

0,1 моль/дм³), витраченого на титрування дослідної проби, см³; 1,7 – кількість H₂O₂ (мг), яка відповідає 1 см³ розчину KMnO₄ ($C(\text{KMnO}_4) = 0,002$ моль/дм³). Міжнародну одиницю активності ензиму розраховували за формулою: $A = (V_K - V_D) \cdot 1,7 / t \cdot M(\text{H}_2\text{O}_2)$, де t – час інкубації (30 с); $M(\text{H}_2\text{O}_2) = 34$ г/моль.

Визначення концентрації GSH проводили в такому порядку: 0,1 г тканини гомогенізували з 2,4 см³ розчину трихлороцтової кислоти. Через 10 хв. проби центрифугували впродовж 15 хв. за 3000 об./хв., відібрали 0,2 см³ центрифугату, додали 0,05 см³ розчину NaOH ($w = 20\%$) і 5 см³ трис-буфера ($\text{pH} = 8,05$; для приготування 1 дм³ використали 6,06 г трис-оксиметиламінометану, 14,85 г ЕДТА для зв'язування двовалентних катіонів і 275 мл HCl, $C(\text{HCl}) = 0,1$ моль/дм³). Потім додали 0,1 см³ реактиву Елмана (99 мг ДТНБК в 25 см³ етанолу). Перемішали і витримали 20 хв. у темряві. Фотометрували за 412 нм у кюветі на 1 см проти контролю на реактиви, що не містили гомогенату. Розрахунок результатів проводили за калібрувальним графіком.

Визначення концентрації АК здійснювали титриметрично. Для цього до 1 г гомогенізованого дослідного матеріалу додали 9 см³ розчину HCl ($w = 2\%$), відстоювали 10 хв. і фільтрували. Відбирали 3 см³ фільтрату (дослідна проба), вносили у колби і титрували розчином 2,6-дихлорфеноліндофенолу ($C(1/2\text{ 2,6-ДФІФ}) = 0,001$ моль/дм³) до появи рожевого забарвлення, яке зберігається впродовж 30 с. Для контролю на реактиви 3 см³ фільтрату кип'ятили з 3 краплями 3%-го H₂O₂ з подальшим титруванням. Розрахунок вмісту АК здійснювали за формулою: $C = Q \cdot (A_d - A_k) \cdot V_0 / (V_1 \cdot a)$, де C – вміст АК, ммоль/кг; Q – кількість аскорбінової кислоти, яка відповідає 1 см³ розчину 2,6-дихлорфеноліндофенолу ($C(1/2\text{ 2,6-ДФІФ}) = 0,001$ моль/дм³) (0,088 мг); V_0 – загальна кількість екстракту, см³; V_1 – об'єм екстракту, взятий для титрування, см³; a – кількість досліджуваної речовини, г; A_k , A_d – об'єм розчину 2,6-ДФІФ, витраченого на титрування контрольної і дослідної проби, см³ ($C(1/2\text{ 2,6 ДФІФ}) = 0,001$ моль/дм³) [11]. Одержані нами результати пройшли математичне та статистичне опрацювання згідно з визначеними методиками.

Результати впливу досліджуваних політантів на стан ПАС у тканинах *Elodea canadensis* наведені в табл. 1 та 2.

Збільшення вдвічі концентрації іонів Pb²⁺ призводить до зростання рівня перекисного окиснення на 94,7%, за ГДК х 3 рівень МДА зростає на 201,9%, за ГДК х 5 – на 592,1%, за ГДК х 10 – на 975%. Зростання рівня ВРПО за аналогічної зміни концентрації NO₃⁻, порівняно з вихідним рівнем, становить 17,1%; 65,8%; 159,2% та 325,6% відповідно. Зміни величини зростання $\Delta\text{МДА}$ за однакових концентрацій різних політантів свідчать, що іони Pb²⁺ мають значно потужнішу прооксидантну активність, порівняно з NO₃⁻.

За ГДК х 2 активність СОД зростає на 16,9%, наступне зростання концентрації NO_3^- призводить до недостовірного зниження активності СОД (3,7%), однак за ГДК х 5 спостерігаємо стрімке падіння активності ферменту. Достовірної різниці між значеннями активності СОД за ГДК х 5 та ГДК х 10 немає. Під впливом щоразу більшої концентрації Pb^{2+} активність СОД зменшується в усіх дослідних групах, причому активність ферменту стрімко падає вже у першій дослідній групі, де різниця складає 58,5%, а в останній – 92,5% (в 13,4 рази). Отже, СОД є більш стійким антиоксидантом за дії NO_3^- , порівняно з дією Pb^{2+} .

Каталаза посилює свою активність за збільшення концентрації NO_3^- у групах з ГДК х 2 та ГДК х 3 на 7,6% та 16,1% відповідно, однак за ГДК х 5 активність ферменту знижується на 18,8%, а за ГДК х 10 – на 55,8%. У разі зростання концентрації Pb^{2+} активність каталази падає в усіх дослідних групах, однак на значно більші величини. Так, за ГДК х 2 активність ферменту зменшується на 8,8%, за ГДК х 3 – на 45,7%, за ГДК х 5 – на 71,4%, за ГДК х 10 – на 85,4%.

Отже, каталаза, подібно до СОД, є більш стійким антиоксидантом за дії NO_3^- , порівняно з дією Pb^{2+} . Однак каталаза є більш стійкою, порівняно із СОД, до дій щоразу більшої концентрації NO_3^- та Pb^{2+} .

АК посилює свої антиоксидантні властивості навіть за перевищення ГДК NO_3^- у 5 разів. Це, можливо, пояснюється здатністю рослини засвоювати азот у незначному надлишку як основний елемент мінерального живлення та захисного значення АК, яка, згідно з літературними даними, бере участь в метаболічній утилізації надлишку NO_3^- . Перевищення дози ГДК NO_3^- у 10 разів призводить до стрімкого зниження вмісту АК на 32,5% від вихідного рівня за одночасного максимального зростання рівня МДА. Можливим поясненням такого процесу є пригнічення синтезу аскорбінової кислоти надлишком NO_3^- та значне гальмування мітозу і фотосинтезу. В разі зростання концентрації Pb^{2+} спостерігаємо збільшення вмісту АК за ГДК х 2 на 37,3%, в усіх подальших експериментальних групах вміст АК знижувався, причому різниця контрольної групи і групи з ГДК х 10 становила 7,8 рази.

Таблиця 1

Результати впливу щоразу більшої концентрації іонів Pb^{2+} на стан ПАС у тканинах *Elodea canadensis*

Показники стану ПАС		Концентрація Pb^{2+}				
		ГДК	ГДК х 2	ГДК х 3	ГДК х 5	ГДК х 10
Прооксидантна активність	ΔМДА, %	15,2 ± 1,53	29,6 ± 1,71	45,9 ± 3,22	105,2 ± 2,88	163,4 ± 3,77
Ферментні антиоксиданти	Активність каталази, $\frac{\text{мкмоль}}{(\text{кг} \cdot \text{хв})}$	64,3 ± 2,89	58,6 ± 1,06	34,9 ± 2,11	18,1 ± 0,94	9,4 ± 0,75
	Активність СОД, ОД	5,08 ± 0,11	2,11 ± 0,07	1,08 ± 0,09	0,46 ± 0,12	0,38 ± 0,08
Низько-молекулярні антиоксиданти	Концентрація АК, $\frac{\text{мкмоль}}{\text{кг}}$	0,83 ± 0,01	1,14 ± 0,06	0,68 ± 0,02	0,21 ± 0,01	0,11 ± 0,01
	Концентрація GSH, $\frac{\text{мкмоль}}{\text{кг}}$	42,11 ± 1,76	49,23 ± 2,05	54,01 ± 1,18	58,26 ± 1,99	34,14 ± 1,82

мкмоль/(кг*хв)

Таблиця 2

Результати впливу щоразу більшої концентрації іонів NO_3^- на стан ПАС у тканинах *Elodea canadensis*

Показники стану ПАС		Концентрація NO_3^-				
		ГДК	ГДК х 2	ГДК х 3	ГДК х 5	ГДК х 10
Прооксидантна активність	ΔМДА, %	15,2 ± 1,53	17,8 ± 1,87	25,2 ± 1,34	39,4 ± 2,11	68,8 ± 3,61
Ферментні антиоксиданти	Активність каталази, $\frac{\text{мкмоль}}{(\text{кг} \cdot \text{хв})}$	64,3 ± 2,89	69,2 ± 1,17	74,6 ± 1,22	52,2 ± 2,44	28,4 ± 1,89
	Активність СОД, ОД	5,08 ± 0,11	5,94 ± 0,43	4,89 ± 0,09	2,16 ± 0,18	1,95 ± 0,09
Низько-молекулярні антиоксиданти	Концентрація АК, $\frac{\text{мкмоль}}{\text{кг}}$	0,83 ± 0,01	1,22 ± 0,07	1,63 ± 0,09	1,01 ± 0,01	0,56 ± 0,03
	Концентрація GSH, $\frac{\text{мкмоль}}{\text{кг}}$	42,11 ± 1,76	51,31 ± 1,15	38,26 ± 1,49	30,08 ± 1,55	27,14 ± 1,77

Єдиним антиоксидантом, який збільшує свою захисну дію зі зростанням вмісту Pb^{2+} , є GSH. Так, за ГДК х 2 його концентрація зросла на 16,9%, за ГДК х 3 – на 28,3%, за ГДК х 5 – на 38,4%. Спадання спостерігаємо лише за ГДК х 10 (18,9%). Це, ймовірно, пояснюється тим, що сульфування є основним метаболічним шляхом детоксикації Pb^{2+} . Концентрація GSH зростає на 21,8% у групі з ГДК х 2 нітрат-іонів та зменшується в усіх інших дослідних варіантах. Як зазначено в літературних джерелах, інтенсивність синтезу визначається рівнем ВРПО, що повністю підтверджується експериментально. Отже, GSH має потужніший антиоксидантний ефект і є більш стійким до зростання концентрації Pb^{2+} , порівняно з АК та ферментними антиоксидантами.

Надтоксичний вплив щоразу більшої концентрації Pb^{2+} на ПАС можна пояснити тим, що він виявляється в усіх субклітинних фракціях, однак більшість акумулюється в ядрі та цитозолі. Високі концентрації Pb^{2+} у мітохондріях спричинюють їхні функціональні та морфологічні зміни, пригнічують дихання та фосфорилування, процеси активного транспорту. В ЕПР Pb^{2+} входить до складу мембран та рибосом. Свинець блокує діяльність ферментних систем клітини, експресію ядерних генів та синтез РНК.

Токсичний вплив Pb^{2+} зумовлений його спорідненістю з клітинними і мітохондріальними мембранами: він порушує окисне фосфорилування, діяльність Na^+K^+ -АТФази та Ca^{2+} -АТФази у клітинах.

Головні висновки. Зміни величини зростання ДМДА свідчать, що іони Pb^{2+} мають значно потужнішу прооксидантну активність, порівняно з NO_3^- . Каталаза є більш стійкою, порівняно із СОД, до дій щоразу більшої концентрації NO_3^- та Pb^{2+} . Будь-яке підвищення концентрації Pb^{2+} призводить до стрімкого зниження активності СОД. GSH має потужніший антиоксидантний ефект і є більш стійким до зростання концентрації Pb^{2+} , порівняно з АК. Аскорбінова кислота проявляє більшу антиоксидантну дію і є стійкішою до зростання концентрації NO_3^- , порівняно з GSH. Низькомолекулярні антиоксиданти більш стійкі до впливу NO_3^- та Pb^{2+} , на відміну від ферментних.

Перспективи використання результатів дослідження. Вивчення зміни потенціалу ПАС тканин рослин під впливом концентрації поллютантів, що зростає, відкриває перспективу можливості використання стану компонентів ПАС як для індикації змін рослинного гомеостазу в стресових умовах, так і для моніторингу безпеки екологічного стану гідросфери.

Література

1. M. Vergolyas. Cytogenetic evaluation of the drinking water toxicity. *EUREKA: Life Sciences*. 2016. No 1. P. 47–54.
2. Water in Changing World. *The United Nations World Water Development Report 3 (WWDR3)*. Paris : UNESCO, 2009. 432 p.
3. Klumpp A. Tradescantia micronucleus test indicates genotoxic potential of traffic emissions in European cities. *Environmental Pollution*. 2006. № 3 (139). P. 515–522.
4. Колупаев Ю.Е. Активные формы кислорода в растениях при действии стрессоров: образование и возможные функции. *Вісник Харківського національного аграрного університету. Серія «Біологія»*. 2007. № 3 (12). С. 6–26.
5. Trchounian A., Petrosyan M., Sahakyan N. Plant cell redox homeostasis and reactive oxygen species. Redox State as a Central Regulator of Plant-Cell Stress Responses / eds. D.K. Gupta et al. Springer International Publishing Switzerland, 2016. P. 25–50.
6. Apel K. Hirt H. Reactive oxygen species: metabolism, oxidative stress, and signal transduction. *Plant Biol*. 2004. No 55. P. 373–399.
7. Smirnoff N. Antioxidants and reactive oxygen species in plants. NY : Blackwell Publishing, 2005. 302 p.
8. Scandalios J.G. The rise of ROS. *Trends Biochem. Sci*. 2002. No 27. P. 483–486.
9. Scandalios J.G. Oxidative stress: molecular perception and transduction of signals triggering antioxidant gene defenses. *Braz. J. Med. Biol. Res*. 2005. No 38. P. 995–1014.
10. Полесская О.Г. Растительная клетка и активные формы кислорода. Москва : КДУ, 2007. 140 с.
11. Bobrova, M., Holodaieva, O., Arkushyna, H., Larycheva, O., Tsviakh, O. (2020) The value of the prooxidant-antioxidant system in ensuring the immunity of plants. *Revista de la Universidad del Zulia*. No 11 (30). P. 237–266. DOI: <https://doi.org/10.46925//rdluz.30.17>.