

2. Ляврін Б. З. Ліпідний обмін у риб малих річок Західного Поділля: автореф. дис. ... біол. наук : 03.00.10. Київ, 2020. 24 с.
3. World Medical Association Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. UMS. 2002. P. 42-46.

УДК: 582.261.2

НАКОПИЧЕННЯ ТА ОЦІНКА ВПЛИВУ ЦИНКУ НА МЕТАБОЛІЗМ *CHLORELLA VULGARIS* Beij.

Колесницький Р. В., Горин О. І., Боднар О. І.

Тернопільський національний педагогічний університет
імені Володимира Гнатюка

E-mail: bodnar@tnpu.edu.ua

Мікроводорості, зокрема *Chlorella vulgaris*, здатні ефективно акумулювати як метали, так і неметалічні мікроелементи завдяки високій адсорбційній здатності клітинних оболонок, відносно великій поверхні поглинання та активному транспорту речовин проти градієнта концентрації. Ці особливості дають змогу мікроводоростям накопичувати мікроелементи у кількостях, що значно перевищують їх вміст у водному середовищі [4, 6].

Chlorella vulgaris широко використовується як модельний об'єкт у біохімічних та біотехнологічних дослідженнях, зокрема для вивчення метаболізму, фотосинтезу та акумуляції корисних сполук [1, 2, 5, 6].

Цинк, у свою чергу, є ключовим елементом метаболізму клітин: входить до складу ензимів дихального ланцюга, фотосинтетичних пігментів та антиоксидантних протеїнів [1, 6]. Він бере участь у стабілізації клітинних мембран, регулює активність численних ензимів, зокрема супероксиддисмутази, і впливає на експресію генів, пов'язаних із ростом та розвитком. Цинк також відіграє важливу роль у процесах сигналізації, синтезі протеїнів та підтриманні осмотичного балансу клітини. Його дефіцит або надлишок може спричинити оксидативний стрес і порушення метаболічної рівноваги.

Метою даної роботи було з'ясування особливостей

накопичення цинку клітинами *Chlorella vulgaris*, зміни у пігментному складі, а також впливу цього елементу на активність енергетичних та антиоксидантних ензимів.

У результаті проведеного нами дослідження встановлено, що водорості інтенсивно накопичують цинк за його додаткового вмісту у середовищі в концентрації 5,0 мг/дм³. За зазначених умов кількість цього мікроелементу у біомасі клітин збільшилася у 12 разів порівняно з контролем. Водночас, мало місце включення цинку до складу внутрішньоклітинних макромолекул – кількість у протеїнах збільшилася у 4,5 раза, у ліпідах – майже у 6,5 рази, а у вуглеводах – у 3,7 раза щодо значень в контролі.

Разом з тим, додаткове надходження цинку у клітини хлорели може спричиняти певні функціональні та метаболічні зміни, передусім ті, які пов'язані з фотосинтезом, а відтак продуктивністю культури чи популяції. Зазначимо, що фотосинтез відіграє важливу роль в адаптації водоростей до впливу органічних і неорганічних іонів [1]. У зв'язку з цим, під час дослідження впливу цинку на *Ch. vulgaris*, було проаналізовано стан фотосинтетичного апарату. Так, за дії цинку спостерігалось підвищення вмісту хлорофілу *a* на 23 % у порівнянні з контролем, тоді як для хлорофілу *b* мало місце збільшення у 1,3 рази відповідно, а каротиноїдів – на 46,6%. Визначено, що зміни у співвідношенні пігментів, зокрема зменшення коефіцієнта хлорофіл *a*/хлорофіл *b*, свідчать про перебудову фотосинтетичних комплексів і адаптацію фотосистем до стресу, а зростання пігментного індексу (каротиноїди/хлорофіл *a*) на 20% підтверджує підвищення антиоксидантної активності клітин хлорели. Збільшення каротиноїдів, як потужних антиоксидантів, що відіграють важливу роль у захисті мембран хлоропластів, стабілізації хлорофілу та нейтралізації пероксидних радикалів [2, 4], свідчить про посилення фотосинтетичної активності клітин водорості в умовах впливу надмірного металічного навантаження.

Рівень ефективності енергетичних систем гідробіонтів загалом і водоростей зокрема є важливим індикатором здатності організмів адаптуватися до стресових умов середовища [3, 4]. З огляду на велику кількість ензимів, залучених до енергетичного обміну в клітині, у нашому дослідженні було проаналізовано

активність сукцинатдегідрогенази – учасника циклу трикарбонових кислот, цитохромоксидази – компонента електронно-транспортного ланцюга, а також глутаматдегідрогенази, яка інтегрує енергетичні й біосинтетичні процеси. Результати показали: підвищення активності цитохромоксидази *Ch. vulgaris* на 55% за дії Zn(II) порівняно з контролем, що свідчить про посилення аеробного дихання та потребу клітин у додатковій енергії для адаптаційних процесів; активація сукцинатдегідрогенази у 1,9 раза, яка підтверджує метаболічну перебудову клітин, оскільки СДГ бере участь як в енергетичному, так й у пластичному метаболізмі, що особливо важливо для швидкої адаптації клітин мікрободоростей [6].

Щодо глутаматдегідрогеназ, то активність НАДН- та НАДФН-залежних форм за дії Zn(II) перевищувала контроль у 2,5 та 1,4 рази відповідно. Це свідчить про активацію як енергетичних, так і азотних обмінних шляхів, що може бути пов'язане із включенням глутамату до циклу Кребса або синтезу нових біомолекул у клітинах хлорели [2, 5].

Водночас, антиоксидантні ензими клітин *Ch. vulgaris* демонструють специфічну залежність від додаткового вмісту цинку у середовищі. Так, спостерігалось підвищення в 1,8 раза активності глутатіонпероксидази та зниження в 1,6 раза активності супероксиддисмутази і в 1,2 раза каталази порівняно з контролем, що свідчить про активізацію захисних механізмів *Chlorella vulgaris* та, очевидно, зменшення потреби в елімінації супероксидів. Зростання активності ГПО, ймовірно, знижувало утворення супероксидних радикалів через ефективне перетворення кисневих форм. Антиоксидантний захист доповнювали неензимні компоненти, зокрема каротиноїди, рівень яких також підвищувався за дії цинку. Це сприяло збереженню пігментного апарату, зменшенню пошкодження мембран та загалом покращенню фізіологічного стану клітин [3, 4].

Отже, отримані результати демонструють потенціал застосування мікрободоростей для біоаккумуляції мікроелементів та біосинтезу цінних біомолекул з перспективою використання у біотехнології.

Список літератури

1. Грубінко В. В. Роль металів в адаптації гідробіонтів: еволюційно-екологічні аспекти. Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені В. Гнатюка. Серія : Біологія. 2011. 3, С. 237–262.
2. Луців А. І., Грубінко В. В. Особливості поглинання Mg^{2+} , Zn^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} клітинами *Chlorella vulgaris* Beijer. Доповіді НАН України. 2013. № 7. С. 138–145.
3. Blokhina O., Virolainen E., Fagerstedt K. V. Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress: a review. *Ann Bot.* 2003. Vol. 91, № 2. P. 179–194. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf118>
4. El-Naggar, A. H., Sheikh, H. M. Response of the green microalga *Chlorella vulgaris* to the oxidative stress caused by some heavy metals. *Life Sci. J.* 2014, 11 (10), pp 1349 – 1357. <https://doi.org/10.7537/MARSLSJ111014.197>
5. Gaur, J. R., Rai, L. C. Heavy metal tolerance in algae. In *Algal adaptation to environmental stresses physiological, biochemical and molecular mechanisms*; Rai, L. C., Gaur, J. P., Eds.; Springer-Verlag: Berlin, 2012; pp 363 – 389.
6. Nowicka B. Heavy metal-induced stress in eukaryotic algae-mechanisms of heavy metal toxicity and tolerance with particular emphasis on oxidative stress in exposed cells and the role of antioxidant response. *Environmental science and pollution research international*. 2022. 29(12), 16860–16911. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18419-w>