

**Н.Ф. Михайленко**

Інститут ботаніки імені М.Г. Холодного НАН України,  
вул. Терещенківська, 2, Київ, 01004, Україна,  
тел.: +38 (044) 272 32 31, e-mail: membrana@ukr.net

## РІСТ ТА ФОТОСИНТЕТИЧНА АКТИВНІСТЬ ЗЕЛЕНИХ ВОДОРОСТЕЙ *CHLORELLA VULGARIS* BEIJER. В ПРИСУТНОСТІ НАНОАКВАХЕЛАТІВ СЕЛЕНУ

**Мета.** Дослідження впливу нової форми селеновмісних препаратів – наноаквахелатів селену, карбоксильованих лимонною кислотою, – на нагромадження біомаси та ефективність протікання реакцій світлової стадії фотосинтезу у одноклітинній зеленій водорості *Chlorella vulgaris*. **Матеріали і методи.** Водорості вирощували в стерильних умовах у колбах місткістю 1 л на рідкому мінеральному середовищі при температурі 25–26 °С і цілодобовому освітленні зі щільністю потоку фотонів 40–42 мкмоль м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Безпосередньо після посіву до культур водоростей додавали розчин карбоксильованих лимонною кислотою наноаквахелатів селену. Масу сухої речовини водоростей визначали гравіметричним методом. Модульовану флуоресценцію хлорофілу а вимірювали при кімнатній температурі і обчислювали основні параметри флуоресценції. **Результати.** Наноаквахелати селену в концентраціях 0,4–4 мг/л стимулювали ріст *C. vulgaris*, причому збільшення біомаси досягало 40–45%. Додавання наночастинок селену в менших концентраціях (0,07 або 0,2 мг/л) спочатку приводило до уповільнення росту культури, проте цей ефект зникав після 18–24 діб культивування. Наноаквахелати селену при додаванні до культур *C. vulgaris* в концентраціях від 0,4 до 4 мг/л викликали початкове підвищення максимальної ефективності фотохімічних реакцій у фотосистемі II (ФСII) та ефективності фотохімічних реакцій у відкритих реакційних центрах ФСII. Через 6 діб після додавання 2 чи 4 мг/л наночастинок селену зростає також коефіцієнт фотохімічного гасіння флуоресценції. Як наслідок, підвищувався квантовий вихід електронного транспорту у ФСII. **Висновок.** Наноаквахелати селену, карбоксильовані лимонною кислотою, в концентраціях від 0,4 до 4 мг/л позитивно впливають на нагромадження біомаси *C. vulgaris*, а також тимчасово підвищують ефективність протікання фотохімічних реакцій у фотосистемі II.

**Ключові слова:** зелені водорості, селен, наночастинки, продуктивність, флуоресценція хлорофілу.



Селен (Se) – мікроелемент, необхідний не лише для гетеротрофних організмів, включаючи ссавців, риб та багато бактерій, але також для деяких зелених водоростей. Разом з тим, фізіологічне значення селену для інших фотосинтезуючих організмів, включаючи вищі рослини, остаточно не визначено [6]. У живих організмах селен міститься переважно у формі селеновмісних білків, заміщуючи атоми сульфуру в деяких залишках цистеїну і метіоніну. Селен відіграє важливу роль у метаболізмі, насамперед за рахунок залучення в процеси захисту від оксидативного стресу. Зокрема, селен входить до складу активних центрів таких ферментів антиоксидантного захисту, як глутатіонпероксидази і тіоредоксинредуктази [12]. Водночас, високі концентрації селену (для багатьох рослин – 1–10 мг/кг і вище) є токсичними [6, 7]. Передусім це зумовлено його надмірним включенням в амінокислоти, що призводить до змін структури білків та порушень їхніх ферментативних функцій. Діапазон концентрацій, що існує між необхідною для організму кількістю селену та його токсичною дією, дуже вузький і залежить від ступеня окиснення селену, типу селеновмісної сполуки, виду організму та інших чинників [4, 7, 13].

Традиційно для забезпечення організмів селеном використовують неорганічні солі – селеніт ( $\text{SeO}_3^{2-}$ ) і селенат ( $\text{SeO}_4^{2-}$ ). Однак перспективним джерелом селену, як і інших мікроелементів, необхідних для метаболізму рослин, є наноматеріали, причому не лише колоїдні розчини наночастинок, але й так звані наноаквахелати – наночастинки, які утримують навколо себе молекули води і/або карбонових кислот як лігандів. Структуру наноаквахелатів описує загальна формула  $[\eta\text{M}^{2n}(\text{H}_2\text{O})_m(\text{HOOCR})_p]^{2n-}$ , де  $\eta\text{M}^{2n-}$  – наночастинка-ядро з електричним зарядом  $2n-$  на поверхні,  $m$  – кількість лігандів  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $p$  – кількість лігандів  $\text{RCOOH}$  [14]. Величина негативного електричного заряду на поверхні наночастинок  $2n$  пов'язана з кількістю лігандів  $m$  і  $p$  співвідношенням:  $2n = 2m + p$ . Здатність гідратованих або карбоксильованих наночастинок легко проникати крізь клітинні мембрани та потім звільнитися від лігандів зумовлює їхню високу біологічну активність укупі з біосумісністю. До того ж, технологія одержання наноаквахелатів забезпечує надзвичайно низьку кількість домішок у кінцевому продукті [1]. Токсичність наноаквахелатів є набагато нижчою, ніж відповідних неорганічних солей [1, 14]. Зараз широко використовуються надчисті наноаквахелати основних біогенних і біоцидних елементів [1]. Перспективним є карбоксилування наноаквахелатів нетоксичною лимонною кислотою.

Метою даної роботи було дослідження впливу наноаквахелатів селену, карбоксильованих лимонною кислотою, на нагромадження біомаси та ефективність протікання реакцій світлової стадії фотосинтезу у *Chlorella vulgaris* – одноклітинної зеленої водорості, широко застосовуваної в багатьох галузях біотехнології. Впровадження нових підходів до оптимізації культивування водоростей у перспективі розширює можливості їх використання як сировини для виробництва цінних хімічних сполук і нових видів біопалива, що відповідають основним викликам сучасності [2, 3].



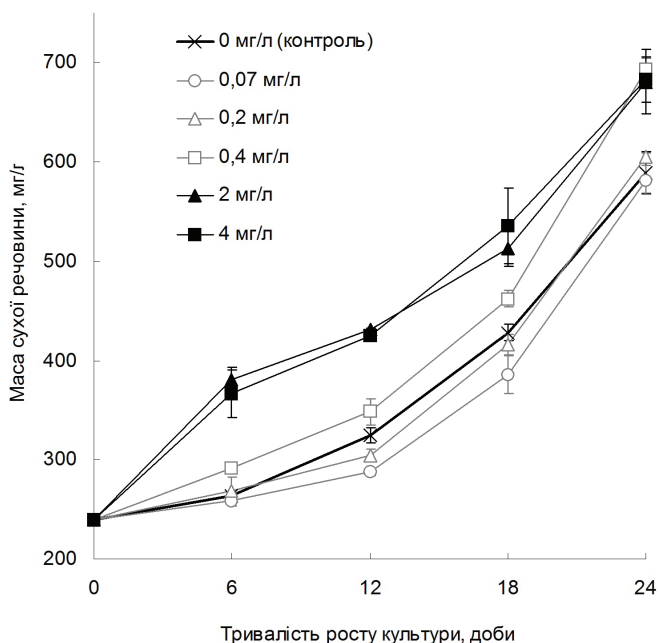
### Матеріали і методи

*Chlorella vulgaris* Beijer. вирощували в стерильних умовах у колбах Ерленмейєра місткістю 1 л на 0,4 л рідкого мінерального модифікованого середовища Тамія [3] при температурі 25–26 °С і цілодобовому освітленні люмінесцентними лампами ЛБ 40 зі щільністю потоку квантів фотосинтетично активної радіації (ФАР) 40–42 мкмоль м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, перемішували шляхом струшування двічі на добу. Безпосередньо після посіву до культур водоростей додавали розчин карбоксильованих лимонною кислотою наноаквахелатів селену, люб'язно наданих проф. В.Г. Каплуненко (Український державний НДІ «Ресурс») [14, 15]. Культуру, залишену без додавання наноаквахелатів селену, використовували як контрольний зразок. Масу сухої речовини водоростей визначали гравіметричним методом. Модульовану флуоресценцію хлорофілу *a* вимірювали при кімнатній температурі за допомогою флуориметра ХЕ-РАМ (Heinz Walz GmbH, ФРН), джерелом діючого та насичуючого світла була галогенова лампа 8 В / 20 Вт (Bellaphot, Osram). Початку вимірювань передувало витримання зразка протягом 10 хв у темряві в оснащій мішалкою кюветі флуориметра. Спалахи вимірювального світла ксенонової газорозрядної лампи (2 Гц, 0,15 мкмоль м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) не викликали фотохімічного розділення зарядів у реакційних центрах фотосистеми II (ФСII) [10]. Щільність потоку квантів ФАР діючого світла була такою ж, як при культивуванні водоростей. Інтенсивність та тривалість спалахів насичуючого світла (5500 мкмоль м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, 1 с) були підібрані таким чином, щоб забезпечити повне закриття всіх реакційних центрів ФСII. Обчислювали основні параметри флуоресценції – максимальну ефективність фотохімічних реакцій у ФСII ( $F_v/F_m$ ), ефективність фотохімічних реакцій у відкритих реакційних центрах ФСII ( $F_v'/F_m'$ ), коефіцієнт фотохімічного гасіння флуоресценції ( $q_p$ ), нефотохімічне гасіння флуоресценції (NPQ) та квантовий вихід електронного транспорту у ФСII ( $\Phi_{PSII}$ ) [8]. Результати наведені у вигляді середніх значень зі стандартними відхиленнями ( $n = 9$ ).

### Результати та їх обговорення

При додаванні 2 чи 4 мг наноаквахелатів селену на 1 л культури водоростей вже за 6 діб нагромадження біомаси *C. vulgaris* зростало приблизно в 1,4 рази (рис. 1). Позитивна дія наночастинок Se на ріст зберігалася впродовж усього експерименту, хоча і дещо послаблювалася з часом. Якщо ж наноаквахелати Se додавали до концентрації 0,4 мг/л, то протягом перших 18 діб ріст прискорювався лише на 7–11%, однак надалі ефект зростав і ставав таким самим, що і у випадку 5- чи 10-разово вищої концентрації наноаквахелатів Se. Зменшення концентрації наночастинок Se до 0,2 і далі до 0,07 мг/л приводило до уповільнення росту культури порівняно з контрольним зразком на 12 добу дослідження, однак маса сухої речовини переставала відрізнятися від контрольної культури на 18 добу у випадку додавання 0,2 мг/л наноаквахелатів Se і на 24 добу – після додавання 0,07 мг/л наноаквахелатів Se.





**Рис. 1.** Нагромадження біомаси *Chlorella vulgaris* при культивуванні в присутності наноаквахелатів селену.

**Fig. 1.** Accumulation of *Chlorella vulgaris* biomass under cultivation in the presence of selenium nanoaquachelates.

З літературних джерел відомо, що неорганічні солі селену у діапазоні концентрацій, близькому до описаного вище, здатні як стимулювати, так і пригнічувати ріст різних видів водоростей [4, 5, 11, 12, 13]. Наприклад, ріст *C. vulgaris* у колбах Ерленмейера при температурі та щільності потоку квантів ФАР, аналогічних застосованим у цій роботі, стимулював селеніт натрію в концентраціях від 25 до 75 мг/л [11].

Додавання наноаквахелатів Se (0,4–4 мг/л) до культур *C. vulgaris* спричиняло початкове підвищення максимальної ефективності фотохімічних реакцій у ФСII, яку характеризує параметр флуоресценції  $F_v/F_m$  (рис. 2А), а також ефективності фотохімічних реакцій у відкритих реакційних центрах ФСII, оцінюваної за параметром  $F_v'/F_m'$  (рис. 2Б). Ступінь прояву і тривалість дії наноаквахелатів Se зростали з підвищенням їх концентрації. Під дією 2 і 4 мг/л наночастинок Se на 6 добу зростав також коефіцієнт фотохімічного гасіння флуоресценції ( $q_p$ ), що оцінює відносну частку відкритих реакційних центрів ФСII (рис. 2В). У присутності 4 мг/л наночастинок Se протягом всього експерименту вірогідно підвищеним було нефотохімічне гасіння флуоресценції (NPQ) (рис. 2Г), яке характеризує витрати енергії у ФСII, не пов'язані безпосередньо з фотохімічними реакціями. Зростання  $F_v'/F_m'$ , в основному, було причиною відповідного підвищення квантового виходу електронного транспорту у ФСII ( $\Phi_{PSII}$ ) – узагальнюючого показника, який математично являє собою добуток  $F_v'/F_m'$  і  $q_p$

(рис. 2Д). Як було показано раніше [10], цитрат у мілімолярних концентраціях, на відміну від цукрів [9], не чинив істотного впливу на фотосинтетичні параметри водоростей. Тому в даній роботі можливий ефект нано- та мікромолярних концентрацій цитрату, наявних у культурах *C. vulgaris*, не вивчався.

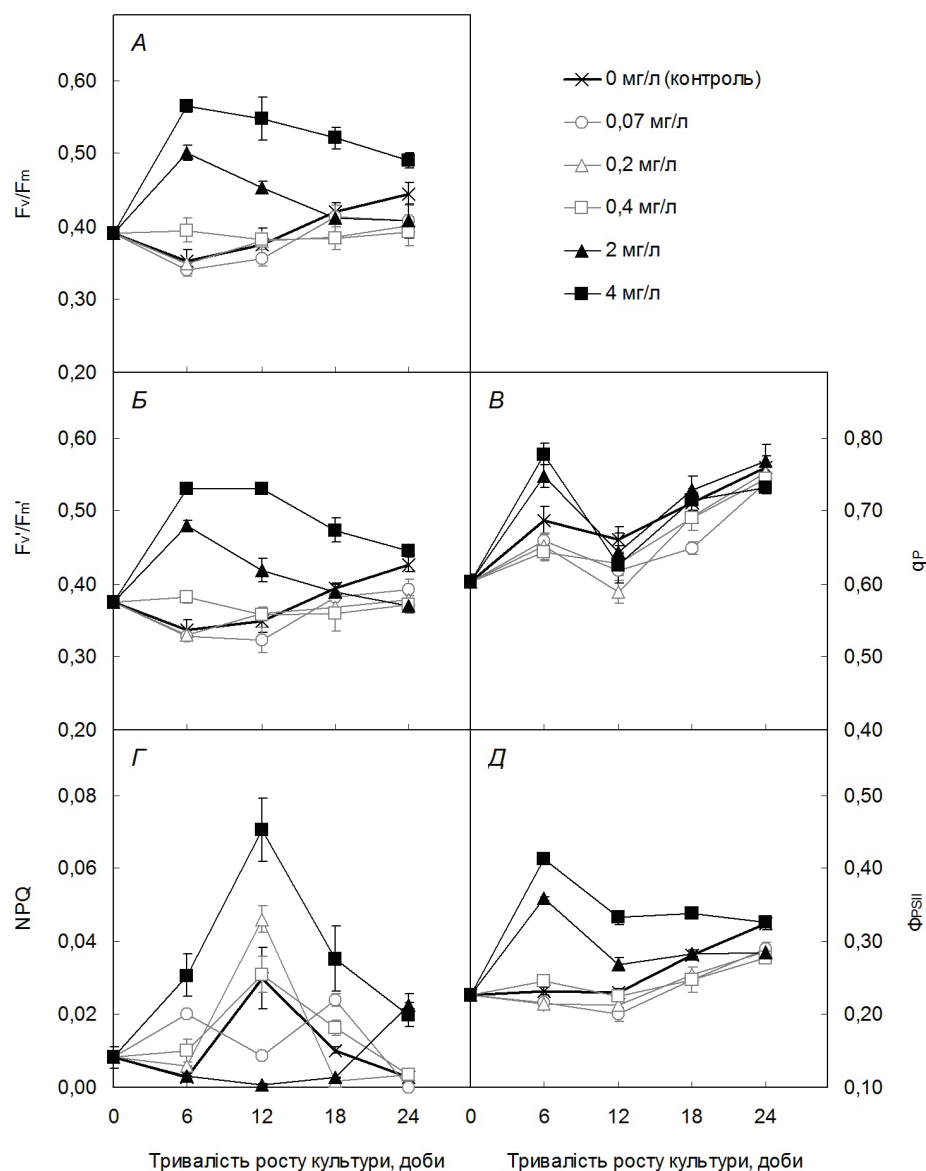


Рис. 2. Параметри флуоресценції хлорофілу *Chlorella vulgaris* у процесі культивування за різного вмісту наноаквахелатів селену в середовищі.

Fig. 2. Chlorophyll fluorescence parameters of *Chlorella vulgaris* during cultivation under various selenium nanoaqua-chelate content in culture medium.



Про вплив селену в будь-якій формі на процеси фотосинтезу досі було відомо мало. Повідомляли, що селенат (120 мг/л) стимулював нагромадження крохмалю в клітинах зеленої водорості *Scenedesmus quadricauda* [12], а селеніт у концентраціях до 75 мг/л підвищував вміст хлорофілу *a* і каротиноїдів впродовж 6 діб культивування *C. vulgaris* [11]. Раніше повідомлялося, що селен не стимулює фотосинтез в *Euglena gracilis* [5], однак у цьому випадку застосовували селеніт, максимальна концентрація якого була до того ж удесятеро меншою, ніж при нашому дослідженні. Тому отримані дані є одним з перших кроків на шляху розуміння механізмів впливу селену на фотосинтетичну продуктивність водоростей. Подальші дослідження потребують зокрема, детального вивчення ефектів, які здійснюють на фотосинтез наноаквахелати селену, в порівнянні з його неорганічними сполуками.

Таким чином, дослідженнями встановлено, що карбоксильовані лимонною кислотою наноаквахелати селену в концентраціях від 0,4 до 4 мг/л позитивно впливають на нагромадження біомаси *Chlorella vulgaris*, а також тимчасово підвищують ефективність протікання фотохімічних реакцій у фотосистемі II. Подальші дослідження в цьому напрямку сприятимуть удосконаленню технологій фототрофного культивування зелених водоростей.

**Н.Ф. Михайленко**

Институт ботаники им. Н. Г. Холодного НАН Украины,  
ул. Терещенковская, 2, Киев, 01004, Украина,  
тел.: +38 (044) 272 32 31, e-mail: membrana@ukr.net

## РОСТ И ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕЛЕННЫХ ВОДОРΟΣЛЕЙ *CHLORELLA VULGARIS* BEIJER. В ПРИСУТСТВИИ НАНОАКВАХЕЛАТОВ СЕЛЕНА

### Реферат

**Цель.** Исследование влияния новой формы селеносодержащих препаратов – наноаквахелатов селена, карбоксилированных лимонной кислотой, – на накопление биомассы и эффективность протекания реакций световой стадии фотосинтеза у одноклеточной зеленой водоросли *Chlorella vulgaris*. **Материалы и методы.** Водоросли выращивали в стерильных условиях в колбах емкостью 1 л на жидкой минеральной среде при температуре 25–26 °С и круглосуточном освещении с плотностью потока фотонов 40–42 мкмоль м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>. Непосредственно после посева к культурам водорослей добавляли раствор карбоксилированных лимонной кислотой наноаквахелатов селена. Массу сухого вещества водорослей определяли гравиметрическим методом. Модулированную флуоресценцию хлорофилла *a* измеряли при комнатной температуре и вычисляли основные параметры флуоресценции. **Результаты.** Наноаквахелаты селена в концентрациях 0,4–4 мг/л стимулировали рост *C. vulgaris*, причем увеличение биомассы достигало 40–45%. Добавление наночастиц селена в меньших концентрациях (0,07 либо 0,2 мг/л) сначала приводило к замедлению роста культуры, однако этот эффект исчезал после 18–24 суток культивирования. Наноаквахелаты селена при добавлении к



культурам *C. vulgaris* в концентрациях от 0,4 до 4 мг/л вызывали начальное повышение максимальной эффективности фотохимических реакций в фотосистеме II (ФСII) и эффективности фотохимических реакций в открытых реакционных центрах ФСII. Через 6 суток после добавления 2 или 4 мг/л наночастиц селена возрастал также коэффициент фотохимического тушения флуоресценции. Вследствие этого повышался квантовый выход электронного транспорта в ФСII. **Вывод.** Наноаквахелаты селена, карбоксилированные лимонной кислотой, в концентрациях от 0,4 до 4 мг/л положительно влияют на накопление биомассы *C. vulgaris*, а также временно повышают эффективность протекания фотохимических реакций в фотосистеме II.

*Ключевые слова:* зеленые водоросли, селен, наночастицы, продуктивность, флуоресценция хлорофилла.

**N.F. Mykhailenko**

M.G. Kholodny Institute of Botany of National Academy of Sciences of Ukraine, 2, Tereshchenkivska str., Kyiv, 01004, Ukraine,  
tel.: +38 (044) 272 32 31, e-mail: membrana@ukr.net

## GROWTH AND PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY OF GREEN ALGAE *CHLORELLA VULGARIS* BEIJER. IN THE PRESENCE OF SELENIUM NANOQUACHELATES

### Summary

**Aim.** Study of the influence of the novel form of selenium-containing additives, selenium nanoaquachelates carboxylated with citric acid, on biomass accumulation and efficiency of the reactions of the light stage of photosynthesis in unicellular green algae *Chlorella vulgaris*. **Materials and methods.** Algae were grown under sterile conditions in 1 L flasks on liquid mineral medium at 25–26 °C. Cultures were provided with continuous irradiation with 40–42  $\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  photon flux density. The solution of selenium nanoaquachelates carboxylated with citric acid was added to algal cultures immediately after inoculation. The dry mass of algae was determined gravimetrically. Modulated chlorophyll a fluorescence was measured at room temperature, and common fluorescence parameters were calculated. **Results.** Selenium nanoaquachelates at 0.4–4 mg/L concentrations stimulated the growth of *C. vulgaris*, and the increase in biomass reached 40–45%. The addition of Se nanoparticles at smaller concentrations (0.07 or 0.2 mg/L) at first caused the retardation of culture growth, but that effect disappeared after 18–24 days of cultivation. When added to *C. vulgaris* cultures at 0.4–4 mg/L concentrations, selenium nanoaquachelates evoked the initial increase in maximal efficiency of Photosystem II (PSII) photochemical reactions and in the efficiency of photochemical reactions in open PSII reaction centres. After 6 days of the addition of 2 or 4 mg/L selenium nanoparticles, the fluorescence photochemical quenching coefficient also increased. As a result, the quantum yield of PSII electron transport has risen. **Conclusion.** Selenium nanoaquachelates carboxylated with citric acid, being added to *C. vulgaris* cultures at 0.4–4 mg/L concentrations, have positive effect on biomass accumulation, and transiently improve the efficiency of Photosystem II photochemical reactions as well.

*Key words:* green algae, selenium, nanoparticles, productivity, chlorophyll fluorescence.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Борисевич В.Б., Каплуненко В.Г., Косинов Н.В., Борисевич Б.В., Сухонос В.П., Хомин Н.М., Телятников А.В., Волошина Н.А., Ткаченко С.М., Дорошук В.А., Корж А.В., Литвиненко Д.Ю., Кулида М.А., Кулинич С.Л., Борисевич В.Б. (мл.), Борисевич Ю.Б., Димчев В.А.* Наноматериалы и нанотехнологии в ветеринарной практике. – К.: ВД «Авіцена», 2012. – 512 с.
2. *Золотарьова О., Шнюкова Є.* Куди прямує біопаливна індустрія? // Вісник НАН України. – 2010. – № 4. – С. 10–20.
3. *Перспективи використання мікроводоростей у біотехнології / О.К. Золотарьова, Є.І. Шнюкова, О.О. Сиваш, Н.Ф. Михайленко.* – К.: Альтерпрес, 2008. – 234 с.
4. *Abdel-Hamid M.I., Skulberg O.M.* Effect of selenium on the growth of some selected green and blue-green algae // *Lakes & Reservoirs: Research & Management.* – 1995. – 1, № 3. – P. 205–211.
5. *Ekelund N.G.A., Danilov R.A.* The influence of selenium on photosynthesis and “light-enhanced dark respiration” (LEDR) in the flagellate *Euglena gracilis* after exposure to ultraviolet radiation // *Aquat. Sci.* – 2001. – 63, № 4. – P. 457–465.
6. *Germ M., Stibilj V., Kreft I.* Metabolic importance of selenium for plants // *Eur. J. Plant Sci. Biotechnol.* – 2007. – 1, № 1. – P. 91–97.
7. *Hamilton S.J.* Review of selenium toxicity in the aquatic food chain // *Sci. Total Environ.* – 2004. – 326, № 1–3. – P. 1–31.
8. *Murchie E.H., Lawson T.* Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications // *J. Exp. Bot.* – 2013. – 64, № 13. – P. 3983–3998.
9. *Mykhaylenko N.F., Syvash O.O., Tupik N.D., Zolotareva O.K.* Exogenous hexoses cause quantitative changes of pigment and glycerolipid composition in filamentous cyanobacteria // *Photosynthetica.* – 2004. – 42, № 1. – P. 105–110.
10. *Mykhaylenko N.F.* The modes of glucose action on photosynthesis of *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. (*Cyanophyta*) as revealed by chlorophyll fluorescence analysis // *International Journal on Algae.* – 2005. – 7, № 3. – P. 213–227.
11. *Sun X., Zhong Y., Huang Z., Yang Y.* Selenium accumulation in unicellular green alga *Chlorella vulgaris* and its effects on antioxidant enzymes and content of photosynthetic pigments // *PLOS One.* – 2014. – 9, № 11. – e112270.
12. *Vítová M., Bišová K., Hlavová M., Zachleder V., Rucki M., Čížková M.* Glutathione peroxidase activity in the selenium-treated alga *Scenedesmus quadricauda* // *Aquat. Toxicol.* – 2011. – 102, № 1–2. – P. 87–94.
13. *Wheeler A.E., Zingaro R.A., Irgolic K., Bottino N.R.* The effect of selenate, selenite, and sulfate on the growth of six unicellular marine algae // *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* – 1982. – 57, № 2–3. – P. 181–194.
14. *Патент України № 35582, МПК В01J 13/00, В32В 5/00, А61N 1/40, Н01J 19/00.* Спосіб отримання гідратованих і карботованих наночастинок “електроімпульсна нанотехнологія отримання гідратованих і карботованих наночастинок” / Косинов М.В., Каплуненко В.Г. (Україна). – № 35582; заявл. 29.04.2008; опубл. 25.09.2008, Бюл. № 18.





15. Патент України № 49050, МПК C07C 51/41, C07F 5/00, C07F 15/00, C07C 53/00, B82B 3/00. Спосіб Каплуненка-Косінова отримання карбоксилатів з використанням нанотехнології / Косінов М.В., Каплуненко В.Г. (Україна). – № 49050; заявл. 23.11.2009; опубл. 12.04.2010, Бюл. № 7.

### References

1. Borisevich VB, Kaplunenko VG, Kosinov NV, Borisevich BV, Sukhonos VP, Khomin NM, Teliatnikov AV, Voloshina NA, Tkachenko SM, Doroshchuk VA, Korzh AV, Litvinenko DIu, Kulida MA, Kulnich SL, Borisevich VB(Jr), Borisevich IuB, Dimchev VA. Nanomaterials and nanotechnologies in the veterinary practice. Kyiv: VD «Avitsena», 2012. 512 p.
2. Zolotareva O, Shniukova Ie. Where biofuel industry goes to? Visnyk NAN Ukrainy. 2010;(4):10-20.
3. Zolotareva OK, Shniukova IeI, Syvash OO, Mykhailenko NF. Prospects of microalgae utilization in biotechnology. Kyiv: Alterpres, 2008. 234 p.
4. Abdel-Hamid MI, Skulberg OM. Effect of selenium on the growth of some selected green and blue-green algae. Lakes & Reservoirs: Research & Management. 1995;1(3):205-211. doi: 10.1111/j.1440-1770.1995.tb00025.x
5. Ekelund NGA, Danilov RA. The influence of selenium on photosynthesis and “light-enhanced dark respiration” (LEDR) in the flagellate *Euglena gracilis* after exposure to ultraviolet radiation. Aquatic Sciences. 2001;63(4):457-465. doi: 10.1007/s00027-001-8044-7
6. Germ M, Stibilj V, Kreft I. Metabolic importance of selenium for plants. The European Journal of Plant Science and Biotechnology. 2007;1(1):91-97.
7. Hamilton SJ. Review of selenium toxicity in the aquatic food chain. Science of the Total Environment. 2004;326(1-3):1-31. doi: 10.1016/j.scitotenv.2004.01.019
8. Murchie EH, Lawson T. Chlorophyll fluorescence analysis: a guide to good practice and understanding some new applications. Journal of Experimental Botany. 2013;64(13):3983-3998. doi: 10.1093/jxb/ert208
9. Mykhaylenko NF, Syvash OO, Tupik ND, Zolotareva OK. Exogenous hexoses cause quantitative changes of pigment and glycerolipid composition in filamentous cyanobacteria. Photosynthetica. 2004;42(1):105-110. doi: 10.1023/B:PHOT.0000040577.30424.d1
10. Mykhaylenko NF. The modes of glucose action on photosynthesis of *Spirulina platensis* (Nordst.) Geitl. (*Cyanophyta*) as revealed by chlorophyll fluorescence analysis. International Journal on Algae. 2005;7(3):213-227. doi: 10.1615/InterJAlgae.v7.i3.20
11. Sun X, Zhong Y, Huang Z, Yang Y. Selenium accumulation in unicellular green alga *Chlorella vulgaris* and its effects on antioxidant enzymes and content of photosynthetic pigments. PLOS One. 2014;9(11):e112270. doi: 10.1371/journal.pone.0112270
12. Vítová M, Bišová K, Hlavová M, Zachleder V, Rucki M, Čížková M. Glutathione peroxidase activity in the selenium-treated alga *Scenedesmus*



*quadricauda*. *Aquatic Toxicology*. 2011;102(1-2):87-94. doi: 10.1016/j.aquatox.2011.01.003

13. Wheeler AE, Zingaro RA, Irgolic K, Bottino NR. The effect of selenate, selenite, and sulfate on the growth of six unicellular marine algae. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 1982;57(2-3):181-194. doi: 10.1016/0022-0981(82)90191-5

14. Patent of Ukraine 35582, MBI B01J 13/00, B32B 5/00, A61N 1/40, H01J 19/00. Method of obtaining the hydrated and carbonated nanoparticles “electroimpulse nanotechnology of obtaining hydrated and carbonated nanoparticles”. Kosinov MV, Kaplunenko VG. (UA). – N 35582; *zayavl.* 29.04.2008; *opubl.* 25.09.2008, *Biul.* N 18.

15. Patent of Ukraine 49050, MBI C07C 51/41, C07F 5/00, C07F 15/00, C07C 53/00, B82B 3/00. Kaplunenko-Kosinov process for the preparation of carboxylates using nanotechnology. Kosinov MV, Kaplunenko VG. (UA). – N 49050; *zayavl.* 23.11.2009; *opubl.* 12.04.2010, *Biul.* N 7.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2016 р.

