

**О. І. Боднар**, к.б.н., докторант

Тернопільський національний педагогічний університет ім. В. Гнатюка  
вул. М. Кривоноса, 2, 46027, Тернопіль, Україна, тел.: (0352) 43-59-01,  
e-mail: bodnar@chem-bio.com.ua

## **ВПЛИВ МІКРОЕЛЕМЕНТІВ НА ЛІПІДНИЙ МЕТАБОЛІЗМ У *CHLORELLA VULGARIS* Beijer.**

Досліджували відносний вміст ліпідів окремих класів, жирнокислотний склад, накопичення селену, цинку і хрому у ліпідах клітин *Chlorella vulgaris* за дії натрію селеніту (10,0 мг Se (IV)/дм<sup>3</sup>) окремо та спільно з Zn<sup>2+</sup> (5,0 мг Zn<sup>2+</sup>/дм<sup>3</sup>) і Cr<sup>3+</sup> (5,0 мг Cr (III)/дм<sup>3</sup>) упродовж 7-ми діб. Встановлено, що співвідношення ліпідів окремих класів за дії досліджуваних чинників практично не змінилося щодо контрольних значень. Виявлено переважання відносного вмісту ненасичених над насиченими жирними кислотами, як за дії селеніту окремо, так і спільно з Zn<sup>2+</sup> та Cr<sup>3+</sup>. Вміст Se (IV) у ліпідах клітин водорості збільшився у 2 рази, Zn<sup>2+</sup> – у 10 разів, а Cr<sup>3+</sup> – у 15 разів, також збільшився вміст мікроелементів у ліпідах різних класів у всіх варіантах досліду порівняно з контрольними значеннями.

**Ключові слова:** мікрowodорості; селен; цинк; хром; ліпіди; жирні кислоти.

Ліпіди у водоростей відіграють важливу роль у забезпеченні росту і розмноження, виконують енергетичну функцію [14]. Роль ліпідів значно посилюється на підтримку життєдіяльності за дії екстремальних чинників середовища, а їх кількість і якісний склад у клітинах, насамперед у мембранах, віддзеркалює здатність до адаптації [19]. Фосфоліпіди – основний компонент клітинних мембран – посередники транспортування фізіологічно необхідних речовин, окремі з яких можуть здійснювати трансмембранне перенесення катіонів: поліфосфатидил-інозитиди – Na<sup>+</sup> і Mg<sup>+</sup>, фосфатидилсерин – Ca<sup>2+</sup>, фосфатидна кислота – Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> та Ca<sup>2+</sup> [20]. Деякі ліпіди беруть участь у реакціях біосинтезу – фосфатидилгліцерол поставляє гліцерофосфатний фрагмент при біосинтезі периплазматичних олігосахаридів [20]. Триацилгліцероли мікрowodоростей є резервом енергії та характеризуються вмістом насичених і мононенасичених жирних кислот, а деякі види водоростей здатні накопичувати і довголанцюгові поліненасичені жирні кислоти [12]. Вільні жирні кислоти є одним з найбільш лабільних компонентів клітин гідробіонтів, метаболізм яких забезпечує первинну відповідь та адаптивні реакції організму на дію чинників. Зростання кількості цих кислот свідчить про посилення катаболічних процесів в організмі та мобілізації жирнокислотних резервів як джерела енергії, або ж вони використовуються в адаптивних перебудовах метаболізму чи біосинтезі інших адаптивних жирних кислот [17, 23].

Слід зазначити, що компенсаторна реакція всіх водних організмів на рівні ліпідного складу у відповідь на стресові умови існування має схожий характер і проявляється, в основному, у зміні вмісту структурних, запасних, регуляторних ліпідів та відповідних жирних кислот, оскільки структурні ліпіди впливають на фазовий стан мембран. Вважається, що коливання у мікрор'язкості ліпідного бішару є достатніми для активації та розвитку регуляторних реакцій, які надалі приводять до адаптивних змін організму [16].

*Chlorella vulgaris* відома як традиційний модельний об'єкт вивчення одноклітинних зелених водоростей та класичний об'єкт біотехнології отримання корисних продуктів: білків, ліпідів, каротиноїдів, вітамінів, тощо [3]. Високу біоаккумуляцію неорганічних солей та утворення їх біокомплексів з макромолекулами клітин водоростей *in vitro* можна використати для одержання біологічно активних добавок, які містять необхідні для організму мікроелементи, наприклад селен та іони біогенних металів [3, 7, 8].

Селен і хром є важливими мікроелементами для обміну речовин тварин і людини за комплексного вживання, бо беруть участь у захисті від вільнорадикальних процесів, в окисно-відновних реакціях, а також знижують рівень глюкози в крові та покращують метаболічні процеси при цукровому діабеті. Додаткове використання цих мікроелементів може слугувати профілактичним засобом при багатьох захворюваннях [11, 22]. Щодо цинку, то це важливий біогенний елемент, який входить до складу ензимів енергетичного та протеїнового метаболізму, фотосинтезу і здійснює регуляцію окисно-відновних процесів у клітинах [17, 23].

Оптимальне співвідношення мікроелементів, які вносяться у середовище культивування, визначає спрямування біохімічних реакцій та перебудову ліпідного метаболізму, що дає змогу ефективно та безпечно включати метали та неметали у ліпіди з метою отримання біотехнологічно корисних продуктів для косметологічних та лікувально-профілактичних цілей.

З огляду на зазначене, досліджували відносний вміст ліпідів окремих класів, жирнокислотний склад та особливості накопичення селену, цинку і хрому ліпідами різних класів у *Chlorella vulgaris* за дії натрій селеніту ( $10,0 \text{ мг/дм}^3$ ) окремо та спільно з  $\text{Zn}^{2+}$  ( $5,0 \text{ мг/дм}^3$ ) і  $\text{Cr}^{3+}$  ( $5,0 \text{ мг/дм}^3$ ) упродовж 7-ми діб їх дії.

### Матеріали та методи досліджень

Об'єктом лабораторного дослідження була альгологічно чиста культура зеленої водорості *Chlorella vulgaris* Beijer CСAP-211/11в, отримана із колекцій Інституту гідробіології НАН України. Водорість культивували на середовищі Фітцджеральда в модифікації Цендера і Горхема № 11, за температури  $22\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$  та освітленні лампами денного світла (інтенсивність  $2500 \text{ лк}$ ) протягом 16 годин на добу [6].

В експериментальних умовах у культуральне середовище додавали водні розчини солей  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  у розрахунку на кількість Se (IV) –  $10,0 \text{ мг/дм}^3$ ,

$ZnSO_4 \times 7H_2O - 5,0$  мг  $Zn^{2+}/дм^3$  та  $CrCl_3 \times 6H_2O - 5,0$  мг  $Cr^{3+}/дм^3$ . Біомасу живих клітин відбирали на 7-у добу експерименту. Контролем була культура водоростей, яку вирощували без додаткового внесення сполук селену, цинку та хрому.

Вміст селену визначали спектрофотометрично на СФ-46 з о'-фенілендіаміном за довжини хвилі 335 нм [2]. Вміст  $Zn^{2+}$  у клітинах хлорели визначали атомно-абсорбційним методом на спектрофотометрі Selmi C-115 M [1]. Вміст  $Cr^{3+}$  визначали за допомогою хромазурулу  $S$  за  $\lambda = 556$  нм [10].

Для біохімічного дослідження ліпіди екстрагували хлороформ-метаноловою сумішшю у відношенні 2:1 за методом Фолча [15]. Кількість загальних ліпідів визначали ваговим методом після відгонки екстрагуючої суміші, висушували та зважували, після чого визначали вміст селену, цинку та хрому. Розділення ліпідів на окремі фракції проводили методом висхідної одновірної тонкошарової хроматографії в герметичних камерах на пластинках із сумішшю силікагелів ЛС 5/40  $\mu$  і Л 5/40  $\mu$  на скляній основі [9]. Рухомою фазою була суміш гексану, діетилового ефіру і льодяної оцтової кислоти у співвідношенні 70:30:1. Одержані хроматограми проявляли у камері, насиченій парами йоду, для ідентифікації окремих фракцій ліпідів використовували специфічні реагенти і очищені стандарти. При цьому виявились: фосfolіпіди (ФЛ), диацилгліцероли (ДАГ), триацилгліцероли (ТАГ) та неетерифіковані жирні кислоти (НЕЖК), в яких визначали вміст мікроелементів [5]. Кількість неполярних ліпідів визначали за допомогою біхроматного методу на спектрофотометрі СФ-46 при довжині хвилі 615 нм. Визначення вмісту окремих класів ліпідів проводили за калібрувальною кривою [5]. Вміст фосfolіпідів визначали за методом Васьковського [24]. За температури 180 °С концентрованою хлорною кислотою проводили мінералізацію фосfolіпідів, а оптичну густину розчину визначали за допомогою спектрофотометра [9].

Для визначення жирнокислотного (ЖК) складу проводили попередню екстракцію ліпідів, користуючись методами, описаними вище. Після промивки осадів проводили метилювання та розділення метилових ефірів жирних кислот на газорідному хроматографі «ЦВЕТ-500» [9]. Співвідношення жирних кислот виражали як частку від їх загальної кількості.

Статистичне опрацювання даних здійснювали за допомогою пакету прикладних програм Statistica 5.5 та Microsoft Office Excel 2010.

### Результати досліджень та їх аналіз

Згідно з дослідженнями [4, 16], іони металів та неметалів змінюють кількісний та якісний склад ліпідів у водних рослин шляхом структурно-функціональних перебудов у їхніх клітинах, насамперед, мембранах, що є основою спрямованого отримання корисних продуктів в альгокультури [13, 19, 20, 21]. Проте, невивченим є питання щодо впливу на ліпідний метаболізм у водоростей біологічно адекватних концентрацій різних за хімічною природою та токсичністю іонів металів та неметалів упродовж біотехнологічно раціональних

термінів їх дії. Тому, нами було досліджено відносний вміст окремих класів ліпідів клітин *Ch. vulgaris* за дії селеніту окремо та спільно з  $Zn^{2+}$  і  $Cr^{3+}$ .

Показано (рис. 1), що за дії натрію селеніту окремо та спільно з  $Zn^{2+}$  і  $Cr^{3+}$  у співвідношенні окремих класів ліпідів клітин *Ch. vulgaris* не відбулось значних змін щодо контролю.

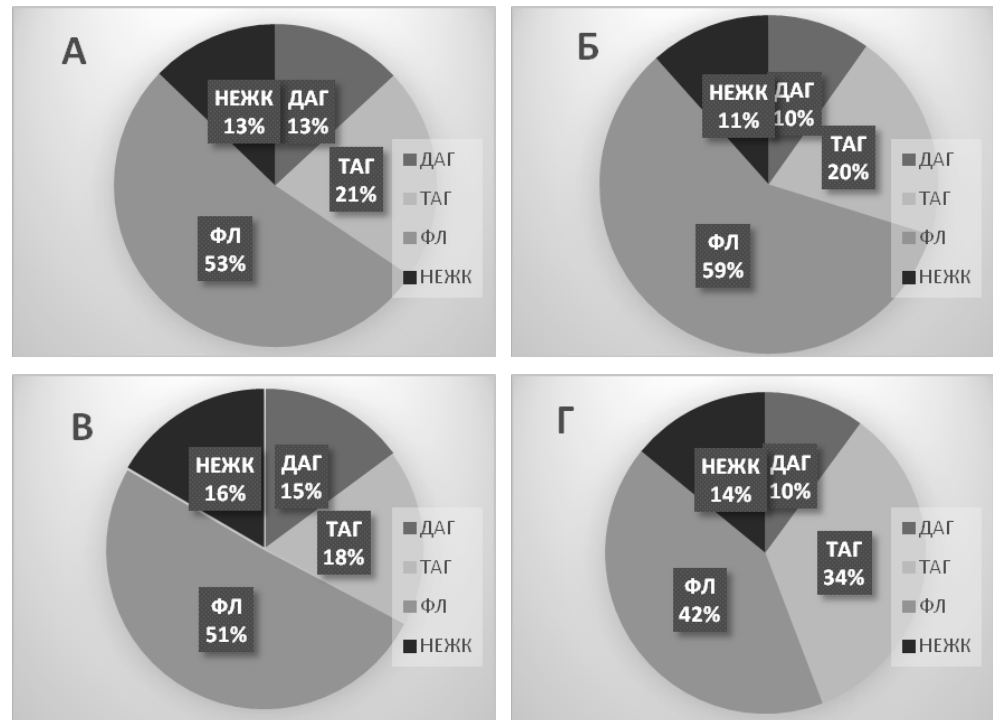


Рис. 1. Відносний вміст ліпідів окремих класів (%) у *Ch. vulgaris* за дії мікроелементів: А – контроль, Б – Se (IV) (10,0 мг Se (IV)/дм³), В – Se (IV) (10,0 мг/дм³) + Zn<sup>2+</sup> (5,0 мг/дм³), Г – Se (IV) (10,0/дм³) + Cr<sup>3+</sup> (5,0 мг/дм³), 7 діб, n=5

Спостерігали лише збільшення відносної кількості ФЛ (на 6 %) за дії селеніту окремо та ТАГ (на 13 %) за спільної дії селеніту з  $Cr^{3+}$ , а також зменшення кількості ФЛ (на 11 %) за спільної дії селеніту з  $Cr^{3+}$  порівняно з контролем.

Очевидно, збільшення частки ТАГ за спільної дії Se (IV) з  $Cr^{3+}$  забезпечує ущільнення клітинних мембран та є захисним механізмом на токсичну дію, передусім хрому. Зростання вмісту ТАГ – один із чинників стабілізації мембран, оскільки вони є попередниками утворення DAG і НЕЖК [14, 23].

Найбільш лабільним компонентом ліпідів, як відомо, є вищі жирні кислоти. Оскільки важливою адаптивною властивістю метаболізму загалом, а у водних рослин, зокрема [14], за дії сполук як металів, так і неметалів, є здатність до зміни складу ЖК. Тому досліджені зміни жирнокислотного складу клітин

*Ch. vulgaris* за дії натрій селеніту (10,0 мг Se (IV)/дм<sup>3</sup>) окремо та спільно з Zn<sup>2+</sup> та Cr<sup>3+</sup> (7 діб).

Встановлено (табл. 1), що внесення у середовище культивування хлорели натрій селеніту окремо зумовило збільшення вмісту ЖК 18:0 на 15,3 %, ЖК 18:1 – на 82,0 %, однак мало місце зменшення кількості ЖК 16:0 на 29,7 % порівняно з контролем, також виявили сліди жирних кислот 12:0, 14:0 та 18:2. За спільної дії селеніту та Zn<sup>2+</sup> відмічене збільшення вмісту ЖК 18:1 на 85,3 % та зменшення кількості ЖК 16:0 – на 24,5 % і 18:0 – на 10,5 %, а також виявили сліди ЖК 12:0, 14:0 та 18:2. Одночасний вплив натрій селеніту та Cr<sup>3+</sup> зумовив щодо контролю збільшення вмісту жирних кислот 14:0, 18:0, 18:1 та 18:2 на 6,3 %, 20,7 %, 73,6 % і 47 % відповідно. Окрім цього, мало місце зменшення кількості ЖК 16:0 на 31,4 % та виявлено сліди ЖК 12:0.

Таблиця 1

**Співвідношення вмісту 12:0/14:0/16:0/18:0/18:1/18:2 жирних кислот у *Ch. vulgaris* за дії натрій селеніту (10,0 мг/дм<sup>3</sup>) окремо та спільно з Zn<sup>2+</sup> (5,0 мг/дм<sup>3</sup>) і Cr<sup>3+</sup> (5,0 мг/дм<sup>3</sup>), 7 діб, %**

Умови досліджу	12:0, % лауринова	14:0, % міристинова	16:0, % пальмітинова	18:0, % стеаринова	18:1, % олеїнова	18:2, % лінолева	Насичені (12:0, 14:0, 16:0, 18:0)/ ненасичені (18:1, 18:2)
контроль	0,96	0,80	60,21	15,00	22,18	0,85	3,34
Se (IV)	сл.	сл.	42,30	17,30	40,40	сл.	1,48
Se (IV)+Zn <sup>2+</sup>	сл.	сл.	45,47	13,43	41,10	сл.	1,43
Se (IV)+Cr <sup>3+</sup>	сл.	0,85	41,30	18,10	38,50	1,25	1,52

Примітка: сл. – слідові кількості.

Необхідно відмітити, що як за дії селеніту окремо, так і спільно з Zn<sup>2+</sup> та Cr<sup>3+</sup> у клітинах *Ch. vulgaris* виявлено переважання відносного вмісту ненасичених жирних кислот над насиченими.

Згідно з отриманими даними, зміни жирнокислотного складу клітин хлорели віддзеркалюють загальні тенденції метаболізму за дії досліджуваних мікроелементів. Значне збільшення кількості ЖК свідчить про посилення катаболічних процесів в організмі та мобілізацію жирнокислотних резервів як джерела енергії або для адаптивних перебудов структурних компонентів клітин [4, 16, 17].

Відомо, що клітинами активніше поглинаються та накопичуються метали та неметали, які здатні реагувати з макромолекулами їх мембран та транспортними білками, і легко та швидко залучаються водними організмами у метаболічні процеси [18].

Проведені нами дослідження показали, що при культивуванні хлорели у середовищі з натрій селенітом окремо та спільно з  $Zn^{2+}$  і  $Cr^{3+}$  мало місце значне збільшення кількості досліджуваних мікроелементів у ліпідах клітин водорості (рис. 2). Так, вміст Se (IV) збільшився в 2,1 рази,  $Zn^{2+}$  – в 10,0 разів, тоді як  $Cr^{3+}$  – в 15,2 разів щодо контрольних значень.

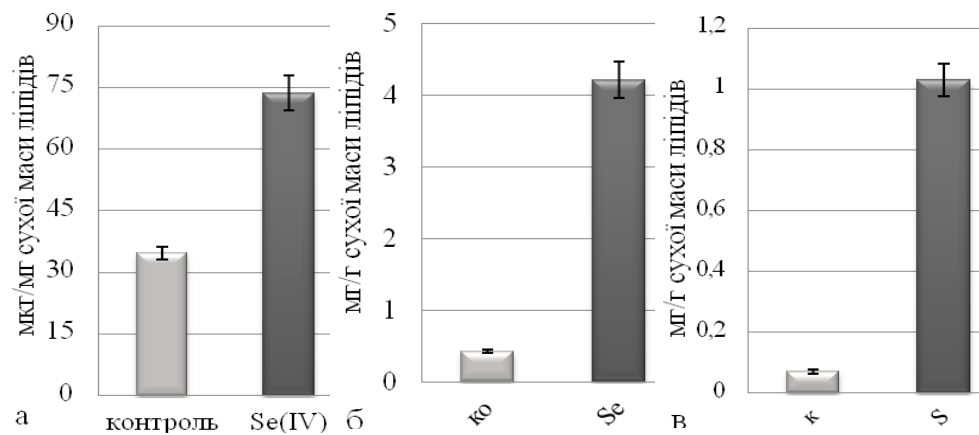


Рис. 2. Вміст селену (а), цинку (б) та хрому (в) у ліпідах клітин *Ch. vulgaris* за їх спільної дії з натрій селенітом ( $10,0 \text{ mg Se (IV)/dm}^3$ ), 7 діб,  $n=5$

Оскільки ліпіди акумулювали значну кількість досліджуваних мікроелементів за їх спільної дії з селенітом (рис. 2), було досліджено особливості включення іонів селену, цинку та хрому до складу ліпідів різних класів за їх спільної дії з натрій селенітом. Встановлено, що вміст досліджуваних мікроелементів у ліпідах різних класів за їх спільної дії з натрій селенітом збільшився у всіх варіантах досліду (табл. 2).

Так, у ФЛ кількість Se(IV),  $Zn^{2+}$  і  $Cr^{3+}$  збільшилася на 125 %, 432 % та 125 %, відповідно щодо контролю. ДАГ теж накопичували значну кількість мікроелементів порівняно з контролем: вміст Se (IV) збільшився на 112 %,  $Zn^{2+}$  – на 180 % та  $Cr^{3+}$  – на 720 %. У складі НЕЖК кількість Se (IV) збільшилася на 10 %,  $Zn^{2+}$  – на 70 % і  $Cr^{3+}$  – на 28 % щодо контрольних значень. Вміст Se (IV),  $Zn^{2+}$  та  $Cr^{3+}$  у ТАГ збільшився відповідно на 116 %, 39 % і 536 % порівняно з значеннями у контролі.

Результати досліджень показали значне збільшення вмісту мікроелементів у ліпідах різних класів щодо контрольних значень у всіх варіантах досліду, що може бути пов'язано з біологічною роллю досліджуваних мікроелементів,

Таблиця 2

Вміст мікроелементів у ліпідах різних класів клітин *Ch. vulgaris* за їх спільної дії з натрій селенітом, 7 діб, n=5

Умови дослідю	Se (IV), мг/г сух. маси ліпідів	Zn <sup>2+</sup> , мг/г сух. маси ліпідів за спільної дії Se (IV)+Zn <sup>2+</sup>	Cr <sup>3+</sup> , мг/г сух. маси ліпідів за спільної дії Se (IV)+Cr <sup>3+</sup>
ФЛ			
контроль	4,11±0,89	4,27±0,87	0,04±0,001
мікроелемент	9,26±1,99	22,73±2,95*	0,09±0,005
ДАГ			
контроль	6,44±1,08	7,53±0,99	0,05±0,002
мікроелемент	13,64±1,67*	21,10±3,10*	0,41±0,02*
НЕЖК			
контроль	4,07±0,22	8,48±0,42	0,32±0,013
мікроелемент	4,45±0,33	14,44±2,06	0,41±0,039
ТАГ			
контроль	20,11±0,59	11,15±1,16	0,11±0,004
мікроелемент	43,41±3,15*	15,45±1,38*	0,70±0,02*

Примітка.\* –  $p < 0,05$  за t-критерієм Стьюдента (щодо контролю).

а також фізіолого-біохімічними властивостями ліпідів, які формують високу спорідненість до досліджуваних іонів.

Хроматографічний аналіз селенвмісних ліпідів з одноклітинних зелених та червоних водоростей *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella primolecta* Butcher та *Porphyridium purpureum* (Bory) Drew & Ross (= *P. cruentum* (S.F. Gray) Nägeli) [22], які зростали за високих концентрацій Se (IV), показав, що селен присутній в усіх фракціях ліпідів, проте механізм включення елемента в усі класи ліпідів поки що незрозумілий. Однак, відмітимо, що включені в ліпіди і в окремі класи ліпідів селен, цинк та хром (рис. 2, табл. 2) зв'язуються з ними міцно, оскільки в результаті процедури виділення в їх складі залишається достатньо велика кількість цих мікроелементів, які піддаються кількісному та якісному визначенню. Можливо, що цей зв'язок є не тільки результатом адсорбції мікроелементів, а й їх включенням до складу молекул ліпідів, насамперед полярних фосфоліпідів, та за місцем подвійного зв'язку в ненасичених жирних кислотах за допомогою ковалентного чи координаційного хімічного зв'язку [7, 8]. Біологічна роль такого включення може бути пов'язана з фізіологічною роллю селену в ліпідах як стабілізаційного чинника стереоструктури макромолекули чи антиоксиданту.

### Висновки

1. Результати досліджень показали, що відносний вміст окремих класів ліпідів клітин *Chlorella vulgaris* як за дії натрій селеніту (Se (IV) 10,0 мг/дм<sup>3</sup>) окремо, так і спільно з Zn<sup>2+</sup> (5,0 мг/дм<sup>3</sup>) і Cr<sup>3+</sup> (5,0 мг/дм<sup>3</sup>) упродовж 7-ми діб їх дії практично не змінився щодо значень у контролі. Виявлено переважання відносного вмісту ненасичених над насиченими жирними кислотами за дії усіх досліджуваних мікроелементів.

2. Встановлено, що за культивування хлорели у середовищі з натрій селенітом окремо та спільно з Zn<sup>2+</sup> і Cr<sup>3+</sup> мало місце значне збільшення кількості досліджуваних металів і неметалів у ліпідах клітин водорості: вміст Se (IV) збільшився в 2 рази, Zn<sup>2+</sup> – в 10 разів, тоді як Cr<sup>3+</sup> – в 15 разів щодо контрольних значень. Вміст досліджуваних мікроелементів у ліпідах різних класів за їх спільної дії з натрій селенітом також збільшувався у всіх варіантах досліду порівняно з показниками у контролі.

3. Спрямування та регуляція ліпідного метаболізму у *Ch. vulgaris* у напрямку збільшення кількості та накопичення ліпідів та їх окремих класів за допомогою натрій селеніту спільно з Zn<sup>2+</sup> та Cr<sup>3+</sup> з метою утворення селенметалліпідних комплексів можна використати для одержання ліпідних біологічно активних препаратів, збагачених есенційними мікроелементами.

Стаття надійшла до редакції 12.08.2018

### Список використаної літератури

1. Атомно-абсорбционный анализ. Учебное пособие / под ред. С. З. Яковлевой. – Л.: Химия, 1983. – 144 с.
2. Дедков Ю. М. Селен: биологическая роль, формы существования и методы определения / Ю. М. Дедков, А. В. Мусатов // Экология промышленного производства. – 2004. – № 3. – С. 19–23.
3. Золотарьова О. К. Перспективи використання мікрводоростей у біотехнології / О. К. Золотарьова, Є. І. Шнюкова, та ін. – Київ : Альтерпрес, 2008. – 234 с.
4. Луців А. І. Регуляція біосинтезу ліпідів у *Chlorella vulgaris* Beij. іонами металів та нафтопродуктами : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня, канд. біол. наук: 03.00.04 «Біохімія» / А. І. Луців. – Тернопіль, 2015. – 24 с.
5. Методы биохимических исследований (липидный и энергетический обмен) : учебное пособие / под ред. М. И. Прохоровой. – Л.: ЛГУ, 1982. – 273 с.
6. Методы физиолого-биохимического исследования водорослей в гидробиологической практике / под ред. А. В. Топачевского. – К.: Наукова думка, 1975. – 247 с.
7. Патент України А61К36/05. Спосіб отримання біологічно активного селен-цинк-ліпідного комплексу з хлорели / Боднар О. І., Вінярська Г. Б., Грубінко В. В., Лихацький П. Г., Фіра Л. С. – № 114650; заявл. 12.10.2016; опубл. 10.03.2017; Бюл. № 5 – 3 с.
8. Патент України А61К 33/04, А61К 33/30, А61К 36/05. Спосіб отримання біологічно активного селен-хром-ліпідного комплексу з хлорели / Лукашів О. Я., Боднар О. І., Вінярська Г. Б., Грубінко В. В. – № 122227; заявл. 17.07.2017; опубл. 26.12.2017; Бюл. № 24. – 3 с.
9. Стефанік М. Б. Тонкослойная и газожидкостная хроматография липидов / М. Б. Стефанік, В. И. Скорохид, О. П. Елисеєва. – Львов, 1985. – 27 с.
10. Яцків О. С. Спектрофотометричне визначення Cr (III) з допомогою хромазурулу S в присут-



- ності Cr(VI) / О. С. Яцків, І. О. Пацай // Методи і об'єкти хімічного аналізу. – 2009. – № 4(1). – С. 43–47.
11. Abd El. B. Healthy benefit of microalgal bioactive substances / El. B. Abd, G. S. El-Baroty // Journal of Aquatic Science. – 2013. – Vol. 1(1) – P. 11–23.
  12. Bigogno C. Accumulation of arachidonic acid – rich triacylglycerols in the microalga *Parietochloris incisa* (Trebuxiophyceae, Chlorophyta) / C. Bigogno, I. Khozin-Goldberg, Z. Cohen // Phytochemistry. – 2002. – Vol. 60. – P. 135–143.
  13. Foulkes E. C. Transport of toxic heavy metals across cell membranes / E. C. Foulkes // Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine. – 2000. – Vol. 223(3). – P. 234–240.
  14. Harwood J. L. The versatility of algae and their lipid metabolism / J. L. Harwood, I. A. Guschina // Biochimie. – 2009. – Vol. 91, N 6. – P. 679–684.
  15. Hokin L. E. Studies on the characterization of the sodium-potassium transport adenosine triphosphatase: IX. On the role of phospholipids in the enzyme / L. E. Hokin, T. D. Hexum // Arch. Biochem. and Biophys. – 1992. – Vol. 151, N 2 – P. 453–463.
  16. Kostiuk K. V. Change of composition of the cellular membranes of the aquatic plants under the impact of toxic substances / K. V. Kostiuk, V. V. Grubinko // Hydrobiol. J. – 2012. – Vol. 48, N 4. – P. 75–92.
  17. Metzler D. Biochemistry: The chemical reactions of living cells / D. Metzler. – New York-London : Academic Press, 2003. – 1973 p.
  18. Molnar S. Comparative studies on accumulation of selected microelements by *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* with the prospects of functional food development / S. Molnar, A. Kiss, D. Virag, P. Forgo // J. Chem. Eng. Process. Technol. – 2013. – Vol. 4, Issue 7 – P. 172.
  19. Morsy A. Effect of heavy metals on plasma membrane lipids and antioxidant enzymes of *Zygothymum* species / A. Morsy, K. Ali Salama, H. Kamel, A. Mansour // EurAsian Journal of BioSciences. – 2012. – N 6. – P. 1–10.
  20. Reid S. P. Phospholipid metabolism and transport across the cell membrane / S. P. Reid // Form and function of phospholipids. – Amsterdam, London, New York: Elsevier, 1993. – P. 423–440.
  21. Rozentsvet O. A. Effect of heavy metals upon lipid metabolism on *P. perfoliatus* / O. A. Rozentsvet, E. S. Bosenko, I. A. Guschina // 16-th Intern. Plant Lipid Symposium. Budapest, Hungary, 1–4 June 2004.: Oral and poster presentations. – Budapest, 2004. – P. 202–204.
  22. Selenium // Alternative Medicine Review. – 2003. – Vol. 8, N. 1. – P. 63–71.
  23. Taiz L. Plant Physiology / L. Taiz, E. Zeiger. – 4-th ed. – Sinauer Associates : Sunderland, 2006. – 764 p.
  24. Vaskovsky V. E. A universal reagent for phospholipids analysis / V. E. Vaskovsky, E. V. Kastetsky // J. Chromatogr. – 1985. – Vol. 114, N 1. – P. 129–141.

**О. И. Боднар**

Тернопольский национальный педагогический университет им. В. Гнатюка  
ул. М. Кривоноса, 2, Тернополь, 46027, Украина, тел.: (0352) 43-59-01,  
e-mail: bodnar@chem-bio.com.ua

**ВЛИЯНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ НА ЛИПИДНЫЙ  
МЕТАБОЛИЗМ В *CHLORELLA VULGARIS* Beijer.**

**Резюме**

**Целью** исследования было определение интенсивности биосинтеза липидов в одноклеточной зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* при действии ионов цинка (II) и хрома (III) в присутствии селенита натрия.

**Результаты.** Содержание ТАГ при действии селенита и селенита с цинком изменялось незначительно по отношению к контролю. При добавлении селенита и хрома количество ТАГ в клетках водоросли существенно увеличивалось – на 76 %. Количество ДАГ при действии селенита отдельно и совместно с ионами хрома значительно уменьшалось (соответственно на 18 % и 15 % относительно контроля), а селенит с ионами цинка увеличивал их содержание на 31 %. Количество фосфолипидов также изменялось: когда действие селенита осуществлялось отдельно или с ионами цинка, их содержание соответственно увеличивалось на 20 % и 10 % по сравнению с контролем, а в сочетании с селенитом и хромом (III) – уменьшалось на 15 %. Согласно выявленным закономерностям, содержание незэстерифицированных жирных кислот изменялось следующим образом: после добавления селенита с ионами цинка и хрома (III) их содержание увеличивалось соответственно на 48 % и 20 % по отношению к контролю. Было обнаружено преобладание относительного содержания ненасыщенных жирных кислот над насыщенными, как в результате активности селенита по отдельности, так и в сочетании с  $Zn^{2+}$  и  $Cr^{3+}$ .

Также показано, что при действии исследуемых микроэлементов содержание Se (IV) в липидах клеток водорослей увеличилось в 2,1 раза,  $Zn^{2+}$  – в 10,0 раз и  $Cr^{3+}$  – в 15,2 раз.

**Выводы.** Таким образом, индивидуальные реакции клеток хлореллы на влияние различных комбинаций солей являются примером адаптации, как на уровне общего метаболизма, так и на уровне липидного обмена.

**Ключевые слова:** микроводоросли, селен, цинк, хром, липиды, жирные кислоты.

**O. I. Bodnar**

V. Hnatiuk Ternopil National Pedagogical University  
TNPU, 2, M. Kryvonosa str., Ternopil, 46027, Ukraine,  
e-mail: bodnar@chem-bio.com.ua

**THE EFFECT OF MICROELEMENTS ON LIPID METABOLISM IN  
*CHLORELLA VULGARIS* Beijer.**

**Abstract**

The **aim** of the study was to determine the intensity of lipid biosynthesis in unicellular alga *Chlorella vulgaris* under the action of zinc and chromium (III) ions in the presence of sodium selenite.

The **results**. The content of TAG under the action of selenite and selenite with zinc varied insignificantly in comparison with the control. After adding selenite and chromium the amount of TAG in the alga cells increased by 76%. The amount of DAG under the action of selenite separately and with chromium ions significantly decreased (by 18% and 15%, respectively), and selenite with zinc ions increased their content by 31%. The content of PL also changed: under the action of selenite only and with zinc ions their content respectively increased by 20% and 10% relative to the control, and when combined with selenite and chromium (III) - decreased by 15%. According to the revealed regularities, the content of non-etherified FA varied in the following way: after adding selenite with zinc and chromium (III) ions, their content increased by 48% and 20%, respectively, in comparison with the control. The predominance of relative content of unsaturated over saturated fatty acids was found both in the result of selenite activity separately and in combination with  $Zn^{2+}$  and  $Cr^{3+}$ . It was also found that the content of Se (IV) in lipids in the alga cells increased 2.1 times,  $Zn^{2+}$  – 10.0 times, and  $Cr^{3+}$  – 15.2 times.

**Conclusion**. Therefore it can be concluded that individual reactions of chlorella cells to the influence of various combinations of salts are an example of adaptation both at the level of general metabolism and at the level of lipid metabolism.

**Keywords:** microalgae, selenium, zinc, chromium, lipids, fatty acids.

**References**

1. Atomic absorption analysis: a textbook. In editor S. Z. Yakovleva. (1983) [Atomno-absorbtsionnyy analiz], Leningrad, Chemistry, 144 p.
2. Dedkov Yu. M., Musatov A. V. (2004) Selenium: biological role, forms of being and methods of determination [Selen: biologicheskaya rol', formy sushchestvovaniya i metody opredeleniya], Ecology of industrial production, V. 3, pp. 19-23.
3. Zolotarova O. K., Shniukova E. I. et. al. (2008) Prospects of the use of microalgae in biotechnology [Perspektyvy vykorystannia mikrovodorostei u biotekhnologii], Kyiv: Alterpres, 234 p.
4. Lutsiv A.I. (2015) Regulation of lipid biosynthesis in *Chlorella vulgaris* Beij. by ions of metals and oil products [Rehulatsiia biosyntezy lipidiv u *Chlorella vulgaris* Beij. ionamy metaliv ta naftoproduktamy. Absrtract dis... kand. biol. nauk], Ternopil, 24 p.
5. Prohorova M. P. (1982) Methods of biochemical research: lipid and energy metabolism. In editor: Prohorova M. P. [Metody biochimicheskikh issledovaniiji (lipidnyji i energeticheskiji obmen)], Leningrad, LGU, 273 p.

6. Topachevskiy A.V. (1975) Methods of physiological and biochemical studies of algae in hydrobiological practice. In editor: Topachevskiy A. V. [Metody fiziologo-biohimicheskikh issledovaniji vodorosley v gidrobiologicheskoy praktike], Kiev: Naukova Dumka, 247 p.
7. Bodnar O. I., Viniarska H. B., Grubinko V. V., Lychatskyi P. H., Fira L. S. (2017) Patent A61K36/05. Method for producing a biologically active selenium-zinc-lipid complex from chlorella [Metod otrymannia biolohichno aktyvnoho selen-tsink-lipidnoho kompleksu z chlorelly], № 114650, publ. 10.03.2017, bullet. № 5, 3 p.
8. Lukashiv O. Ya., Bodnar O. I., Viniarska H. B., Grubinko V. V. (2017) Patent A61K 33/04, A61K 33/30, A61K 36/05. Method for producing a biologically active selenium-chromium-lipid complex from chlorella [Metod otrymannia biolohichno aktyvnoho selen-chrom-lipidnoho kompleksu z chlorelly], № 122227; publ. 26.12.2017, bullet. № 24, 3 p.
9. Stefanik M. B., Skorokhid V. I., Eliseeva O. P. (1985) Thin-layer and gas-liquid chromatography of lipids [Tonkoslojynaya i gazozhydkostnaya chromatografiya lipidov], Lvov, 27 p.
10. Yatskiv O. S., Patsay I. O. (2009) Spectrophotometric determination of Cr (III) with the chromazurol S in the presence of Cr (VI) [Spektrofotometrychne vyznachennia Cr (III) z dopomohoiu chromazyrolu S u prysutnosti Cr (IV)], Methods and objects of chemical analysis, No 4 (1), pp. 43-47.
11. Abd El. B., El-Baroty G. S. (2013) Healthy benefit of microalgal bioactive substances, Journal of Aquatic Science, Vol. 1 (1), pp. 11–23.
12. Bigogno C., Khozin-Goldberg I., Cohen Z. (2002) Accumulation of arachidonic acid – rich triacylglycerols in the microalga *Parietochloris incisa* (Trebuxiophyceae, Chlorophyta), Phytochemistry, Vol. 60, pp. 135–143.
13. Foulkes E. C. (2000) Transport of toxic heavy metals across cell membranes, Proceedings of the Society for Experimental Biology and Medicine, Vol. 223 (3), pp. 234–240.
14. Harwood J. L., Guschina I. A. (2009) The versatility of algae and their lipid metabolism, Biochimie, Vol. 91, No 6, pp. 679–684.
15. Hokin L. E., Hexum T. D. (1992) Studies on the characterization of the sodium-potassium transport adenosinetriphosphatase: IX. On the role of phospholipids in the enzyme, Arch. Biochem. and Biophys., Vol. 151, No 2, pp. 453–463.
16. Kostiuk K. V., Grubinko V. V. (2012) Change of composition of the cellular membranes of the aquatic plants under the impact of toxic substances, Hydrobiol. J., Vol. 48, No 4, pp. 75–92.
17. Metzler D. (2003) Biochemistry: The chemical reactions of living cells, New York-London: Academic Press, 1973 p.
18. Molnar S., Kiss A., Virag D., Forgo P. (2013) Comparative studies on accumulation of selected microelements by *Spirulina platensis* and *Chlorella vulgaris* with the prospects of functional food development, J. Chem. Eng. Process. Technol., Vol. 4, Issue 7 : 172.
19. Morsy A., Salama K. Ali, Kamel H., Mansour A. (2012) Effect of heavy metals on plasma membrane lipids and antioxidant enzymes of *Zygophyllum* species, EurAsian Journal of BioSciences, No 6, pp. 1–10.
20. Reid S. P. (1993) Phospholipid metabolism and transport across the cell membrane, In Form and function of phospholipids, Amsterdam, London, New York: Elsevier, pp. 423–440.
21. Rozentsvet O. A., Bosenko E. S., Guschina I. A. (2004) “Effect of heavy metals upon lipid metabolism on *P. perfoliatus*”, 16-th Intern. Plant Lipid symposium, Budapest, Hungary, 1-4 June 2004. : oral and poster presentations, Budapest, pp. 202–204.
22. Selenium (2003), Alternative Medicine Review. Vol. 8, No 1. pp. 63–71.
23. Taiz L., Zeiger E. (2006) Plant Physiology ( 4-th ed.), Sinauer Associates : Sunderland, 764 p.
24. Vaskovsky V. E., Kastetsky E. V. A universal reagent for phospholipids analysis, J. Chromatogr., Vol. 114, No 1, pp. 129–141.