

С.І. ЛОСЬ, Р.М. ФОМІШИНА,
С.М. ВАСИЛЬЧЕНКО, О.О. СИВАШ

Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України
вул.Терещенківська, 2, м. Київ, 01601, Україна
membrana@ukr.net

ФОТОСИНТЕТИЧНИЙ АПАРАТ СЬАНОРНУТА ПІД ВПЛИВОМ ЧЕРВОНОГО СВІТЛА

Ключові слова: синьозелені водорості, світлова адаптація, червоне світло, хлорофіл, фікобілінові пігменти

Синьозелені водорості мають надзвичайно пластичний метаболізм, завдяки якому опановують різноманітні екологічні ніші та адаптуються до різних умов навколишнього середовища. Інтенсивність та якісний склад світла є головними екологічними чинниками, які регулюють фотосинтетичну активність водоростей. Світлова адаптація останніх суттєво підвищує ефективність використання світла, сприяє розвитку пристосувальних реакцій, спрямованих на підтримку гомеостазу клітини та узгодження процесів життєдіяльності із зовнішніми умовами. Світло впливає на клітинний метаболізм як безпосередньо — через фотосинтез, так і опосередковано — шляхом фоторегуляційних механізмів. Особливістю фотосинтетичного апарату *Cyanophyta* є наявність фікобілінових пігментів, які формують дуже ефективну світлозбиральну антену, що перекриває всю ділянку фотосинтетично активної радіації (ФАР) і надає можливість адаптуватися до різних умов освітлення. Головними світлозбиральними комплексами синьозелених водоростей є фікобілісоми (ФБС). Вони складаються з фікоеритрину (ФЕ), фікоціаніну (ФЦ) та алофікоціаніну (АФЦ), поглинають і передають енергію на реакційні центри фотосистем. Багато синьозелених водоростей здатні до комплементарної хроматичної адаптації (КХА), що полягає у зміні складу та вмісту фікобілінових пігментів, при цьому забарвлення організмів є додатковим щодо кольору діючого світла [7, 8, 16]. Під час КХА відбуваються зміни молекулярної структури фікобілісом — не лише складу кожного стрижня, а й їх кількості, ядра та розміру [14]. КХА проявляється на рівні транскрипції генів, які кодують поліпептидні субодиниці фікоціаніну та фікоеритрину.

Механізм впливу світла на синтез пігментів і функціональні характеристики фотосинтетичного апарату потребує подальших досліджень, які сприятимуть з'ясуванню специфіки хроматичної адаптації різних видів водоростей, матимуть практичне значення для оптимізації умов їх культивування, цілеспрямованого синтезу певних речовин, підвищення продуктивності.

Нові можливості для вивчення адаптації світлозбиральної системи ціанобактерій відкриває застосування світлодіодів, що надають можливість посилен-

© С.І. ЛОСЬ, Р.М. ФОМІШИНА, С.М. ВАСИЛЬЧЕНКО, О.О. СИВАШ, 2008

ного впливу у вузьких спектральних діапазонах у ділянці поглинання фотосинтетичних пігментів.

Ми досліджували реакцію фотосинтетичного апарату та приріст біомаси ряду представників синьозелених водоростей, які належать до різних таксонів, на вплив червоного світла світлодіодів.

Матеріали і методи досліджень

Вивчали альгологічно чисті культури синьозелених водоростей з колекції культур водоростей відділу мембранології та фітохімії Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України (IBASU-B) [5], зокрема: з класу *Hormogoniophyceae* — *Spirulina platensis* (Nordst) Geitl, *Phormidium tennissium* Woronich (порядок *Oscillatoriales*), *Nostoc linckia* (Roth) Born. et Flah, *N. punctiforme* (Kutz.) Hariot (шт. 39), *N. muscorum* Ag. (шт. 81) (порядок *Nostocales*), з класу *Chroococophyceae* — *Microcystis aeruginosa* Kutz. emend. Elenk.

Spirulina platensis вирощували на середовищі Зарроука [3], представників роду *Nostoc* та *Microcystis aeruginosa* — на середовищі Фітцджеральда № 11 [17], а *Phormidium tennissium* — Громова № 6 [1]. Водорості культивували в колбах Ерленмеєра ємністю 0,5 л на стерильних мінеральних середовищах, освітлюючи люмінесцентними лампами (ЛБ-40) з інтенсивністю білого світла $140 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ і фотоперіодом 12 год протягом одного тижня [4]. Далі їх адаптували до низької інтенсивності білого світла ($25 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ протягом одного тижня. На 15-ту добу росту починали підсвічування червоним світлом світлодіодів ($\lambda_{\text{макс}} = 630 \text{ нм}$, $\Delta\lambda = 20 \text{ нм}$) інтенсивністю $75 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$.

Проби для аналізу відбирали через 72 год від початку підсвічування червоним світлом. Вміст пігментів визначали спектрофотометрично за допомогою спектрофотометра (СФ 46), як і в нашій попередній праці [6]. Функціональний стан фотосинтетичного апарату досліджували методом індукції флуоресценції хлорофілу на флуорометрі ХЕ-РАМ (Heinz Waltz Gmb, Німеччина). Фотохімічне (qP) і нефотохімічне (qN) гасіння флуоресценції хлорофілу визначали за активації фотохімічних реакцій актинічним світлом з щільністю потоку фотонів $20 \text{ мкмоль} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$. Проведено три серії експериментів з 9- та 10-кратною повторністю визначення параметрів, за отриманими даними виводили середні показники. Результати обробляли статистично, стандартні відхилення не перевищували 5 %.

Результати досліджень та їх обговорення

Пігментний апарат синьозелених водоростей складається з комплексу фікобілінових пігментів, хлорофілу *a* та каротиноїдів. Фікобілінові пігменти осциляторієвих водоростей і мікроцистису представлені фікоціаніном (максимум поглинання — 618—620 нм) та алофікоціаніном (650 нм), тоді як ностоки, крім цих пігментів, містять ще й фікоеритрин (560 нм).

Результати вивчення впливу червоного світла світлодіодів на пігментний апарат свідчать про зменшення вмісту всіх пігментів у досліджених видів во-

доростей, проте у різних видів — різною мірою (табл. 1). Так, у *Spirulina platensis* кількість фікоціаніну і алофікоціаніну за цих умов знижувалась на 33,5 та 30,5 % відповідно. Також зменшувався вміст хлорофілу *a* (Хл) — на 32,1 % і каротиноїдів (Кар) — на 17,4 %. Співвідношення ФЦ/АФЦ, ФЦ/Хл, АФЦ/Хл майже не змінювалися, тимчасом як відношення каротиноїдів до хлорофілу (Кар/Хл) під впливом червоного світла підвищувалося.

Phormidium tenissium, як і *S. platensis*, належить до порядку *Oscillatoriales*, характеризується удвічі меншим вмістом фікобілінових пігментів порівняно зі спіруліною. Під впливом червоного світла їхня концентрація значно знижувалася (на 48 %). Співвідношення фікобілінових пігментів не змінювалося, проте відношення ФЦ/Хл ставало помітно меншим. Частка фікоціаніну і алофікоціаніну у фікобіліновому комплексі становила у *S. platensis* 0,70:0,30, у *Phormidium tenissium* — 0,68:0,32 стосовно їх сумарної кількості та мало змінювалася за обраних умов дослідження.

Усі досліджені нами види роду *Nostoc* у контрольному варіанті містили майже однакову абсолютну кількість фікоеритрину та алофікоціаніну, проте дещо відрізнялися за вмістом фікоціаніну (табл. 1). При цьому вміст алофікоціаніну в усіх ностоків був удвічі меншим, аніж фікоеритрину.

Пігментний апарат видів роду *Nostoc* реагував на червоне світло зниженням вмісту всіх пігментів. Так, найвідчутніше зменшувався вміст фікоеритрину (у *N. linckia* — на 25 %, *N. muscorum* — на 33 %) та фікоціаніну (у *N. punctiforme* — на 22 %, *N. muscorum* — на 35 %), дещо менше — вміст алофікоціаніну (у *N. linckia* — на 20 %, *N. muscorum* — на 26 %). Концентрація хлорофілу знижувалася на 12–15 %, тимчасом як каротиноїди були найстабільнішими. Отже, серед ностоків найчутливішим до дії червоного світла виявився *N. muscorum*. При цьому під впливом червоного світла величини відношень фікобілінових пігментів ФЕ/ФЦ та ФЦ/АФЦ майже не змінювалися, ФЕ/Хл і ФЦ/Хл знижувались, а Кар/Хл — дещо підвищувалося.

У *N. punctiforme* зменшення величини ФЕ/Хл було більшим, аніж ФЦ/Хл, у *N. linckia* — навпаки. У контрольному варіанті частка фікобілінових пігментів ФЕ:ФЦ:АФЦ у їх комплексі становила: *N. punctiforme* — 0,39:0,43:0,18, *N. muscorum* — 0,44:0,34:0,22, *N. linckia* — 0,45:0,34:0,21.

Слід зауважити, що під впливом червоного світла частка фікоеритрину ставала дещо зменшувалася, тоді як сумарний вміст фікоціаніну та алофікоціаніну підвищувався, що може свідчити про хроматичну адаптацію. У *N. linckia* співвідношення цих пігментів не змінювалось.

Для порівняння реакції фотосинтетичного апарату водоростей з різних таксонів вищого порядку ми досліджували *Microcystis aeruginosa* (*Chroococophyceae*), який за морфологічними ознаками є найпримітнішим щодо гормонієвих водоростей. Його пігментний апарат містить на порядок менше фікобілінових пігментів, аніж інші види водоростей, за вмістом хлорофілу та каротиноїдів вони майже не різняться (табл. 1). Результати дослідів засвідчують високу стабільність фікобілінового комплексу *M. aeruginosa* до впливу

Таблиця 1. Вміст пігментів та їх співвідношення у синьозелених водоростей під впливом червоного світла, мг/г сухої маси

Варіант	ФЕ	ФЦ	АФЦ	ХЛ	Кар	ФЕ/ФЦ	ФЦ/АФЦ	ФЕ/ХЛ	ФЦ/ХЛ	Кар/ХЛ
				<i>Spirulina platensis</i>						
Контроль	—	141,1±7,05	58,09±3,48	16,04±0,42	3,84±0,15	—	2,43	—	8,79	0,24
Дослід	—	93,78±4,68	40,36±2,42	10,88±0,48	3,17±0,14	—	2,32	—	8,62	0,29
				<i>Phormidium tennisium</i>						
Контроль	—	73,78± 3,1	34,85±1,64	16,65± 0,02	3,68±0,01	—	2,1	—	4,43	0,22
Дослід	—	38,83±1,56	17,95±0,87	12,10±0,12	3,13±0,04	—	2,2	—	3,2	0,25
				<i>Nostoc linckia</i>						
Контроль	67,61±2,8	51,85±2,14	31,35±1,50	13,51±0,40	2,65±0,06	1,30	1,65	5,0	3,83	0,19
Дослід	50,46±2,03	37,24±1,66	24,97±1,26	11,91±0,43	2,50±0,06	1,35	1,49	4,23	3,12	0,21
				<i>N. punctiforme</i>						
Контроль	68,92±2,34	75,39±3,2	32,97±1,60	9,19±0,25	2,27±0,04	0,92	2,28	7,49	8,19	0,25
Дослід	49,94±1,68	58,20±2,45	25,12±1,54	7,82±0,22	1,91±0,05	0,85	2,32	6,38	7,40	0,24
				<i>N. muscorum</i>						
Контроль	72,16±2,64	56,12±2,40	36,10±1,74	13,54±0,04	2,60±0,18	1,28	1,55	5,32	4,41	0,19
Дослід	48,25±1,66	36,35±1,75	26,51±1,46	11,48±0,18	2,42±0,05	1,32	1,37	4,20	3,16	0,21
				<i>Microcystis aeruginosa</i>						
Контроль	—	7,59±0,26	4,96±0,20	9,87±0,24	3,03±0,05	—	1,53	—	0,76	0,31
Дослід	—	7,15±0,25	4,52±0,19	7,68±0,17	2,62±0,06	—	1,57	—	0,93	0,34

червоного світла та збільшення величини співвідношення ФЦ/Хл з 0,76 до 0,93, тобто про хроматичну адаптацію.

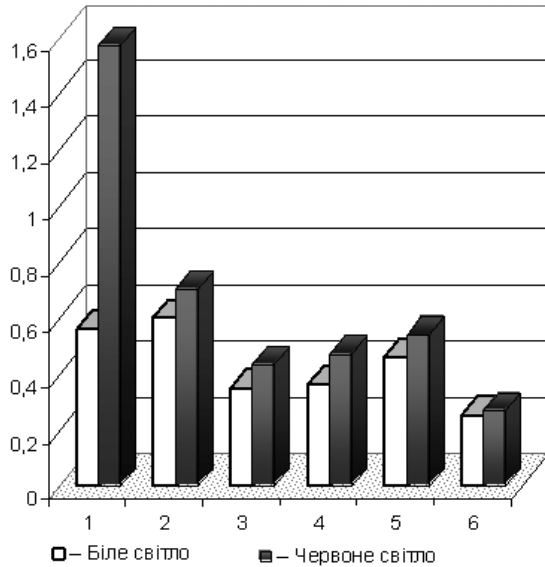
Отримані нами результати щодо репресивної дії червоного світла на пігменти узгоджуються з наведеними в [2, 11–14].

Під впливом червоного світла в усіх досліджених видів водоростей спостерігався приріст біомаси (рисунок). Найбільшим він був у *S. platensis* — у 2,8 раза перевищував контроль (біле світло). Помірний приріст біомаси зафіксовано у представників роду *Nostoc* — 17–29 %, а найменший — у *M. aeruginosa* (до 5 %).

Таким чином, енергія червоного світла ефективніше утилізується фотосинтетичним апаратом водоростей, що й виявилось у зменшенні вмісту всіх пігментів і накопиченні біомаси.

Коефіцієнт фотохімічного гасіння флуоресценції хлорофілу (q_P), котрий характеризує частку відкритих реакційних центрів фотосистеми II, під впливом червоного світла у досліджуваних видів майже не змінювався — за винятком *M. aeruginosa* (табл. 2). Це доводить здатність ціанобактерій підтримувати на високому рівні частку відкритих реакційних центрів ФСII за рахунок гнучких механізмів регулювання електронного транспорту і високого співвідношення ФСІ/ФСII [10]. У *M. aeruginosa* ми відзначали зниження величини q_P на 30 %, що засвідчує збільшення частки закритих центрів, вищий рівень відновленості переносників електронтранспортного ланцюга та зниження можливості відведення електронів від ФСII. Рівень нефотохімічного гасіння флуоресценції (q_N) був дуже варіабельним: у *S. platensis* і *Ph. tennissium* за умов підсвічування світлодіодами його величина зростала в 1,5–2,0 рази, у *N. linckia* — у 2,2, у *N. muscorum* — на 22 %, у *N. punctiform* — на 7,6 %, тоді як у *M. aeruginosa* майже не змінювалася.

Нефотохімічне гасіння флуоресценції ФСII ціанобактерій корелює з потоком збудження від ФСII до ФСІ. Коли компоненти електронтранспортного ланцюга перебувають у відновленому стані, низьким є рівень флуоресценції ФСII, а високим — перенесення енергії електронного збудження до ФСІ [9]. Відзначені нами вищі значення q_N за умов червоної досвітки пов'язані з підвищеним рівнем відновленості компонентів електронтранспортного ланцюга водоростей.



Вміст біомаси (г/л) водоростей за різних умов освітлення: 1 — *S. platensis*, 2 — *Ph. tennissium*, 3 — *N. linckia*, 4 — *N. punctiforme*, 5 — *N. muscorum*, 6 — *M. aeruginosa*

Concentration biomass (g/L) of algae under different conditions of lighting: 1–6 — species of algae

Отже, реакція різних видів синьозелених водоростей на зміни спектрального складу світла неоднозначна. Ступінь мінливості пігментного апарату водоростей залежить від генетичних особливостей культур, вихідного складу та вмісту пігментів, а також лабільності регуляторних механізмів клітин, які контролюють синтез пігментів. У нашому досліді в усіх водоростей вміст пігментів зменшувався під впливом червоного світла, проте реакція різних видів була специфічною. Пігментні системи також реагували по-різному: найбільшій виявилися фікобілінові пігменти, значно менше реагував хлорофіл, а каротиноїди були порівняно стабільними. Найбільшу мінливість пігментів (зниження вмісту фікобіліпротеїнів на 30—48 %, хлорофілу — на 27—32 %) спостерігали у водоростей порядку *Oscillatoriales* — *P. tennissium* та *S. platensis*, у представників роду *Nostoc* концентрація фікобілінових пігментів знижувалася на 20—35 %, а хлорофілу — 12—15 % від контролю. Червоне світло сприяло значному накопиченню біомаси, особливо у *S. platensis*.

Таблиця 2. Флуоресцентні параметри синьозелених водоростей залежно від умов освітлення

Варіант	qP	qN
	Інтенсивність актинічного світла, мкмоль · м ⁻² · с ⁻¹	
	20	20
	<i>Spirulina platensis</i>	
Контроль	0,937±0,046	0,316±0,017
Дослід	0,930±0,050	0,457±0,022
	<i>Phormidium tennissium</i>	
Контроль	0,833±0,014	0,140±0,002
Дослід	0,842±0,025	0,278±0,046
	<i>Nostoc linckia</i>	
Контроль	0,922 ± 0,042	0,133 ± 0,009
Дослід	0,898 ± 0,038	0,303 ± 0,009
	<i>N. punctiforme</i>	
Контроль	0,758± 0,040	0,197± 0,007
Дослід	0,800± 0,042	0,212± 0,028
	<i>N. muscorum</i>	
Контроль	0,792±0,010	0,165±0,080
Дослід	0,794±0,034	0,201±0,060
	<i>Microcystis aeruginosa</i>	
Контроль	0,809 ± 0,042	0,101 ± 0,005
Дослід	0,572 ± 0,032	0,107 ± 0,008

Серед ностоків найстабільнішим був пігментний апарат *N. linckia*, що, мабуть, можна пояснити його екоотопом (виділений з Екологічного каньйону в Ізраїлі). Відносна толерантність *N. linckia* виявляється у вищій стабільності вмісту пігментів та зменшенні розсіювання червоного світла. За цими показниками певною толерантністю відзначається також *M. aeruginosa*, а найчутливішим виявився *N. muscorum*. Загалом відношення ФЕ/ФЦ і ФЦ/АФЦ були досить стабільними, тоді як величини відношень ФЦ/Хл і ФЕ/Хл помітно знижувались, а Кар/Хл — ледь зростало під впливом червоного світла. Ми пояснюємо це фотозахисною функцією даних пігментів.

Таким чином, проведені дослідження виявили суттєву адаптивну перебудову фотосинтетичного апарату водоростей в умовах червоного світла.

На підставі біохімічних та флуоресцентних показників можна говорити про ефективне використання червоного світла фотосинтетичним апаратом водоростей, що свідчить про високий рівень відновленості компонентів електронтранспортного ланцюга. Існує певна аналогія щодо реакції пігментів і накопичення біомаси під впливом червоного світла та білого світла високої інтенсивності.

Ми не встановили прямої залежності величини qP та приросту біомаси у різних водоростей, проте червоне світло досить ефективно використовувалось у процесах фотосинтезу, хоча надлишок червоної радіації синьозелені водорості розсіюють, що є одним із механізмів їхньої адаптації до умов середовища.

Якщо порівнювати ступінь впливу червоного світла на вміст пігментів і метаболізм досліджених водоростей, то найменш вираженою була реакція *M. aeruginosa*, дещо більшою — представників роду *Nostoc*, а найсильніше реагувала *S. platensis*.

Отримані дані засвідчують, що за природою синьозелені водорості є тіньлюбними організмами, а більш світлолюбні серед них — *S. platensis* і *N. linckia*.

Висновки

1. Енергія червоного світла ефективно утилізується водоростями, що виявляється у зменшенні вмісту всіх пігментів і накопиченні біомаси.

2. Надлишок червоної радіації розсіюється ними. Це засвідчується підвищенням рівня нефотохімічного гасіння флуоресценції (qN), яке є одним із механізмів адаптації.

3. Отримані дані виявляють видоспецифічну реакцію водоростей на вплив червоного світла. Найменше реагував *M. aeruginosa*, а найбільше — *S. platensis*.

4. Застосування монохроматичних червоних світлодіодів дає змогу цілеспрямовано змінювати спектральний склад штучних джерел світла, досліджувати видові особливості адаптації культур до світлового режиму та значно зменшувати витрати електроенергії, тому його можна рекомендувати для промислового культивування водоростей.

Автори висловлюють щире подяку науковому співробітникові Інституту ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України канд. біол. наук Н.Д. Тупик за надання культур мікроводоростей.

1. Громов Б.В., Титова Н.Н. Коллекция культур водорослей лаборатории микробиологии Биологического института ЛГУ // Культивир. коллекц. штаммов водорослей. — Л.: ЛГУ, 1983. — С. 3—27.
2. Жевнер В.Д., Гусев М.В., Шестков С.В. Изменение состава и содержания пигментов синезеленых водорослей в зависимости от спектрального состава света и освещенности // Микробиол. — 1965. — **34**, вып. 2. — С. 209—215.
3. Михайлов А.А., Верзилин И.Н., Пиневич В.В., Шаренкова Х.А. Влияние температурных и световых условий культивирования на продуктивность *Spirulina platensis* (Gom.) Geitl. // Науч. докл. высш. шк. Биол. науки. — 1972. — № 2. — С. 67—73.
4. Сиваш А.А., Лось С.И., Фомишина Р.Н., Золотарева Е.К. Регуляторная роль глюкозы в метаболизме некоторых представителей *Cyanophyta* // Альгология. — 2004. — **14**, № 1. — С. 39—47.
5. Судьина Е.Г., Шнюкова Е.И. Каталог культур микроводорослей коллекции АН СССР. — М.: Наука, 1991. — 151 с.
6. Фомишина Р.Н., Лось С.И. Адаптационная изменчивость пигментов представителей рода *Nostoc* Vauch. (*Cyanophyta*) в различных условиях освещения // Альгология. — 2001. — **11**, № 3. — С. 327—333.
7. Bennett A., Bogorad L. Complementary chromatic adaptation in a filamentous blue-green alga // J. Cell Biol. — 1973. — **58**, N 2. — P. 419—435.
8. Campbell D. Complementary chromatic adaptation alters photosynthetic strategies in the cyanobacterium *Calothrix* // Microbiology. — 1996. — **142**, N 5. — P. 1255—1263.
9. Campbell D., Hurry V., Clarke A.K. et. al. Chlorophyll fluorescence analysis of cyanobacterial photosynthesis and acclimation // Microbiol. Mol. Biol. Rev. — 1998. — **62**, N 3. — P. 667—683.
10. Campbell D., Bruce D., Carpenter C. et. al. Two forms of the photosystem II D1 protein alter energy dissipation and state transitions in the cyanobacterium *Synechococcus* sp. PCC 7942 // Photosynth. Res. — 1996. — **47**, N 1. — P. 131—144.
11. Czeżuga B. The effect of light on the control of the photosynthetically active pigments in plants: IV chromatic adaptation in blue-green algae *Anabaena cylindrica* and *Anabaena variabilis* // Phyton (Horn). — 1986. — **26**, N 1. — P. 1—9.
12. Hattori A., Fujita Y. Formation of Phycobilin pigments in a blue-green algae *Tolypothrix tenuis* as induced by illumination with colored lights // Biochem. J. — 1959. — **46**, N 4. — P. 521—524.
13. Ley A.C., Butler W.L. Effects of chromatic adaptation on the photochemical apparatus of photosynthesis in *Porphyridium cruentum* // Plant Physiol. — 1980. — **65**, N 4. — P. 714—722.
14. Ohki K., Fujita Y. Photoregulation of phycobilisome structure during complementary chromatic adaptation in the marine cyanophyte *Phormidium* sp. // Phycology. — 1992. — **28**, N 6. — P. 803—808.
15. Shyam R., Raghavendra A.S., Sane P.V. Role of dark respiration in photoinhibition of photosynthesis and its reactivation in the cyanobacterium *Anacystis nidulans* // Physiol. Plant. — 1993. — **88**. — P. 446—452.
16. Tandeau de Marsac. Occurrence and nature of chromatic adaptation in cyanobacteria // J. Bacteriol. — 1977. — **130**. — P. 82—91.
17. Zehnder A., Gorham P.K. Factors influencing the growth of *Microcystis aeruginosa* Kutz. Emend. Elenk // Can. J. Microbiol. — 1960. — **6**. — P. 645—660.

Рекомендує до друку
І.В. Косаківська

Надійшла 14.05.2007

ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ ЦЯНОФИТЫ ПОД ВЛИЯНИЕМ КРАСНОГО СВЕТА

Исследовано влияние красного света светодиодов ($\lambda_{\text{max}} = 630$ нм, $\Delta\lambda = 20$ нм) на фотосинтетический аппарат и рост ряда видов синезеленых водорослей. Показана видоспецифичность реакции водорослей на красную подсветку. Наибольшее снижение содержания пигментов отмечено у представителей порядка *Oscillatoriales*. Пигментные системы также реагировали по-разному — самыми лабильными оказались фикобилиновые пигменты. У видов рода *Nostoc* под влиянием красного света снижалась доля фикоэритрина, а суммарное содержание синих пигментов увеличивалось, что указывает на хроматическую адаптацию. Под влиянием красного света соотношения между фикобилиновыми пигментами были достаточно стабильными, величина отношений ФЦ и ФЕ к Хл ощутимо снижалась, а КАР/Хл — увеличивалась. На основании биохимических и флуоресцентных показателей выявлены толерантные к красному излучению виды водорослей. Красная подсветка способствовала повышению биомассы водорослей, особенно у *Spirulina platensis*. Проведенные исследования свидетельствуют о значительной перестройке фотосинтетического аппарата и показывают специфическую реакцию водорослей на действие красного света, что необходимо учитывать при их массовом культивировании.

Ключевые слова: синезеленые водоросли, световая адаптация, красный свет, хлорофилл, фикобилиновые пигменты.

PHOTOSYNTHETIC APPARATUS OF CYANOPHYTA UNDER THE IMPACT OF RED LIGHT

The effect of additional red illumination of light-emitting diodes (LED) ($\lambda_{\text{max}} = 630$ nm, $\Delta\lambda = 20$ nm) added to background light of luminescent lamps on the photosynthetic apparatus and growth of several species of blue-green algae (Cyanophyta) has been studied. It has been shown the species-specific dependence of algal reactions on red backlighting. The greatest decrease of pigments has been found in cyanobacteria of order *Oscillatoriales*. The most marked alterations among pigments of phycobilisomes was observed. The percentage of phycoerythrin in genus *Nostoc* was decreased and the sum of blue pigments increased under the red backlighting. These data may indicate the chromatic adaptation. The ratio of phycobiliproteins were stable under the red backlighting, whereas the ratio of phycocyanin and phycoerythrin to chlorophyll markedly decreased; on the contrary, the carotenoids/chlorophyll ratio was increased. The addition of red light to background of white fluorescent lamp illumination resulted in an increase of biomass accumulation, especially in *Spirulina platensis*. These data show substantial rearrangements of the photosynthetic apparatus and specific reaction of algae to the red backlighting. The obtained results can be useful for cultivation of algae.

Key words: blue-green algae, adaptation to light, red light, chlorophyll, phycobilin pigments.