



УДК 579:582.26/.27:581.57

Т. В. Ефимова, м. н. с.

Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского Национальной академии наук Украины, Севастополь, Украина

## ВЛИЯНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА ФОТОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДОРΟΣЛИ *ISOCHRYSIS GALBANA*

У примнезиофитовой водоросли *Isochrysis galbana* при адаптации к синему и зелёному свету уменьшилось содержание углерода и азота в клетках по отношению к белому свету. Скорости деления клеток на белом, синем, зелёном и красном свету были примерно равны. Действие спектрального состава света также не влияло на поглощение водорослями света, отношение органического углерода к азоту в клетках и содержание пигмента ХЛ *a* в органическом веществе.

**Ключевые слова:** микроводоросли, хроматическая адаптация, скорость деления клеток, поглощение света пигментами, отношение С / ХЛ *a*.

Примерно половина синтезируемого на Земле органического вещества приходится на долю фотосинтеза водных растений. Одноклеточный морской фитопланктон, как правило, находится на глубинах от 0 до 150 м [13]. Фитопланктон, обитающий в верхних слоях Мирового океана, фотосинтезирует, поглощая свет в диапазоне всего видимого спектра (от 400 до 700 нм). При увеличении глубины происходит изменение спектра проникающей солнечной радиации, и в результате к нижней границе эвфотической зоны океана проникает преимущественно синезелёный свет низкой интенсивности [3, 4]. В то же время эффективность поглощения света разного

спектрального состава (СПСС) зависит от таксономической принадлежности доминирующих в фитопланктонном сообществе видов. Для понимания принципов пространственного распределения различных таксономических групп фитопланктона и их вклада в первичную продукцию, необходимо учитывать хроматическую адаптацию фитопланктонного сообщества.

Цель настоящей работы – изучить влияние различного спектрального состава света на фотобиологические характеристики водоросли *Isochrysis galbana* Parke, 1949.

**Материал и методы.** Объектом исследования служила морская Prymnesinophyceae *Isochrysis galbana* из коллекции отдела экологической физиологии водорослей ИнБЮМ НАН Украины.

Для выращивания *I. galbana* использовали среду Гольдберга в модификации [1]. Для поддержания постоянного РН среды производили барботаж суспензий водорослей воздухом. Для выращивания культур использовали 4 фотобиореактора, которые представляют собой плоскопараллельные кюветы из бесцветного стекла объёмом 1.2 л с рабочей толщиной слоя 20 мм. Культуры выращивали в накопительном режиме с периодическим разбавлением питательной средой. Общий период адаптации длился 43 дня.

Режим освещения был круглосуточным. В качестве источника света использовали лампу дневного света LIGHTSKY spiral 60 W. Цветные режимы освещения созданы комбинированием белого света и цветных фильтров (рис. 1).

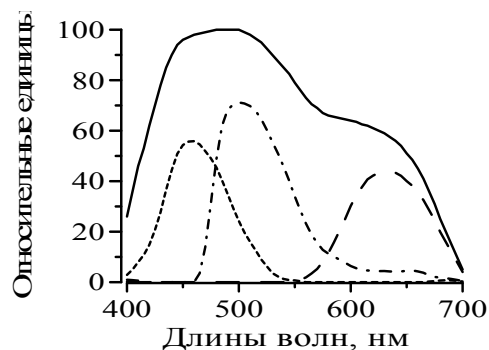


Рис. 1 Спектральные характеристики источников освещения: — белый, --- красный, — · — зелёный, · · · · · синий

Fig. 1 Spectral property of lighting sources: — white, --- red, — · — green, · · · · · blue

Кюветы с культурой располагались по обе стороны от источника освещения на таких расстояниях, чтобы обеспечить одинаковое количество световых квантов, поглощаемых пигментами. Это делалось для того, чтобы исключить влияние различного количества поглощённой световой энергии, и выделить действие СРСС. Рассчитанное количество поглощаемых квантов составляло  $4 \times 10^{20}$  квантов / мг Хл *a* в час, что соответствует падающему белому свету  $13 \text{ мкЕ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

Спектры поглощения света водорослями измерялись:

1. На 4-й (белый и красный свет) и 5-й дни адаптации (синий и зелёный свет) в период экспоненциальной фазы роста;

2. На 40-й день адаптации, т. е. на 6-й день после второго разведения, в период экспоненциальной фазы роста.

Спектры поглощения света водорослями измеряли на двухлучевом регистрирующем спектрофотометре Specord UV-VIS. Оптическая плотность собранной на фильтре взвеси –  $OD_{fp}(\lambda)$  – определяли на увлажнённых средой фильтрах (для сравнения использован увлажнённый чистый фильтр). Спектры поглощения света детритом в пробе –  $OD_{fd}(\lambda)$  – получены после обработки фильтров метанолом. Для пересчёта  $OD_{fp}(\lambda)$  и  $OD_{fd}(\lambda)$  в значения оптической плотности взвеси ( $OD_p(\lambda)$ ) и детрита ( $OD_d(\lambda)$ ) в суспензии использовано уравнение [7]. Далее эти данные были использованы в расчёте коэффициентов поглощения света взвесью

$$\alpha_p(\lambda) = 2.3 OD_p(\lambda) / l_g, \text{ м}^{-1}$$

и детритом

$$\alpha_d(\lambda) = 2.3 OD_d(\lambda) / l_g, \text{ м}^{-1},$$

где: 2.3 – коэффициент для перехода от десятичного логарифма к натуральному;  $l_g$  – геометрическая длина пути, м.

Спектр поглощения света водорослями ( $\alpha_{ph}(\lambda)$ ) найден по разности спектров поглощения взвеси и детрита. Затем проведена нормировка на содержание Хл *a* ( $\alpha_{ph/chl}(\lambda)$ ,  $\text{м}^2 / \text{мг Хл } a$ ). Данные по содержанию пигментов описаны в [1].

Спектрально-специфический коэффициент поглощения света, нормированный на содержание ХЛ *a*, который учитывает как спектральные характеристики света, так и количество фактически поглощаемых квантов света, рассчитан [8]:

$$\alpha_{ph/chl}^* = \int_{400}^{700} \alpha_{ph/chl}(\lambda) PAR(\lambda) d\lambda / \int_{400}^{700} PAR(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Содержание органического С и N определяли методом газо-адсорбционного хроматографического анализа на CHN-1. Для этого культуры фильтровали при разрежении не более 0,2 атм. через Whatman GF/C стекловолокнистые фильтры. Затем фильтры с навеской культуры водорослей сжигали в CHN-1 анализаторе после обработки 15 % соляной кислотой [6]. Фильтры перед фильтрованием предварительно прокаливали при  $300^\circ\text{C}$  в течение 24 ч. Собранные на фильтрах пробы водорослей просушивали и хранили до сжигания в эксикаторе в присутствии обезвоженного хлористого кальция.

Для анализа использовали газ носитель гелий, насадочную колонку с неподвижной фазой Porapak-Q и стандартный образец р-нитроанилин. Содержание N и C в стандартном образце 20.27 и 52.12 % соответственно. Содержание N и C в навеске рассчитывали по разнице содержания N и C в высушенных фильтрах с навеской и в пустых фильтрах по калибровочным кривым, полученным при сжигании навесок стандартного образца (коэффициент корреляции определения N составил 0.97, C – 0.95).

**Результаты.** Скорость деления водорослей. В экспоненциальной фазе роста микроводорослей *I. galbana* в накопительной культуре максимальная скорость деления ( $\mu$ ) наблюдалась при адаптации к зелёному свету (после 3 – 5 сут/ адаптации), минимальная – при адаптации к красному свету (4 сут/ адаптации). Однако в целом изменения  $\mu$  при адаптации к свету различного спектрального состава существенно не отличались от контроля, т. е. от  $\mu$  клеток культуры, адаптированной к белому свету. В течение последующих 6 – 15 сут. хроматической адаптации значения  $\mu$  уменьшились, что было связано с переходом культуры из экспоненциальной фазы роста в стационарную. При этом на белом и красном свету  $\mu$  оставались практически идентичными, а на синем и зелёном свету  $\mu$  уменьшились в два раза по отношению к белому свету адаптации (табл. 1).

В конечном итоге данное уменьшение  $\mu$  привело к уменьшению численности водорослей на синем и зелёном свету в 5.8 и 2.7 раз соответственно по сравнению с белым светом адаптации (рис. 2).

Сутки	Свет			
	Белый	Красный	Синий	Зелёный
1	0.3 ± 0.03	0.8 ± 0.08	0.1 ± 0.01	0.2 ± 0.02
2	1.1 ± 0.1	0.9 ± 0.09	0.9 ± 0.09	1.0 ± 0.1
3	1.1 ± 0.1	0.9 ± 0.09	1.1 ± 0.1	1.3 ± 0.1
4	1.1 ± 0.1	1.0 ± 0.1	1.1 ± 0.1	1.3 ± 0.1
5	0.7 ± 0.07	0.6 ± 0.06	1.1 ± 0.1	1.3 ± 0.1
6	0.6 ± 0.06	0.5 ± 0.05	0.2 ± 0.02	0.3 ± 0.03
7	0.6 ± 0.06	0.5 ± 0.05	0.2 ± 0.02	0.3 ± 0.03
8	0.5 ± 0.05	0.5 ± 0.05	0.2 ± 0.02	0.2 ± 0.02
9 – 10	0.5 ± 0.05	0.5 ± 0.05	0.2 ± 0.02	0.2 ± 0.02
11	0.4 ± 0.04	0.5 ± 0.05	0.2 ± 0.02	0.2 ± 0.02
12	0.4 ± 0.04	0.5 ± 0.05	0.2 ± 0.02	0.1 ± 0.01
13	0.4 ± 0.04	0.5 ± 0.05	0.2 ± 0.02	0.1 ± 0.01
14	0.2 ± 0.02	0.4 ± 0.04	0.1 ± 0.01	0.1 ± 0.01
15	0.2 ± 0.02	0.3 ± 0.03	0.1 ± 0.01	0

Табл. 1 Скорости деления клеток культуры водорослей *I. galbana*, адаптированных к СПСС,  $\mu$ , число делений / сутки  
Table 1 Growth rates of *I. galbana* culture adapted to different light quality,  $\mu$ , number of divisions / day

В конечном итоге данное уменьшение  $\mu$  привело к уменьшению численности водорослей на синем и зелёном свете в 5.8 и 2.7 раз соответственно по сравнению с белым светом адаптации (рис. 2). После разбавления накопительных культур водорослей *I. galbana* на 15-е сутки питательной средой, скорости деления клеток в культурах в экспоненциальной фазе роста уменьшились при всех хроматических вариантах адаптации. При этом наибольшая  $\mu$  наблюдалась при адаптации к зелёному свету, а наименьшая – к синему свету. При адаптации к

белому и красному свету максимальные  $\mu$  практически не отличались. Однако, при адаптации к белому, красному и зелёному свету после 6-го дня после разведения культуры уже вышли из экспоненциальной фазы, а при адаптации к синему свету культура продолжала оставаться в экспоненциальной фазе в течение 10 дней (табл. 2). За счёт этого конечная численность клеток *I. galbana* на синем свете к моменту второго разведения сравнивалась с численностями клеток остальных хроматически адаптированных культур (рис. 3).

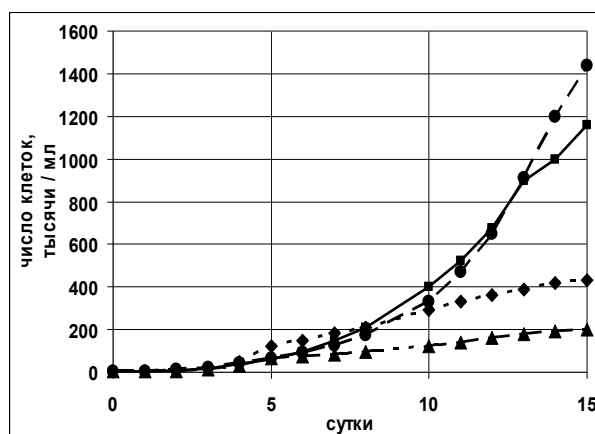


Рис. 2 Динамика концентрации клеток культуры *I. galbana* в 1 – 15 сутки (■ — белый, ● — — — красный, ▲ — · · · — синий, ◆ — — — — зелёный)  
Fig. 2 The dynamics of *I. galbana* cell concentration on the 1 – 15<sup>th</sup> days (■ — white, ● — — — red, ▲ — · · · — blue, ◆ — — — — green)

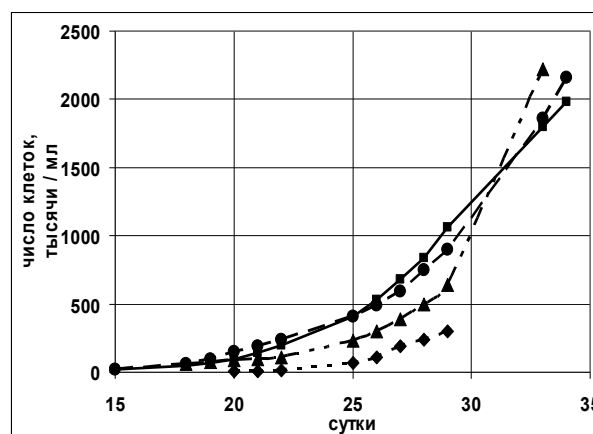


Рис. 3 Динамика концентрации клеток культуры *I. galbana* в 16 – 34 сутки (■ — белый, ● — — — красный, ▲ — · · · — синий, ◆ — — — — зелёный)  
Fig. 3 The dynamics of *I. galbana* cell concentration on the 16 – 34<sup>th</sup> days (■ — white, ● — — — red, ▲ — · · · — blue, ◆ — — — — green)

Сутки	Свет			
	Белый	Красный	Синий	Зелёный
16 – 18	0.4 ± 0.04	0.6 ± 0.06	–	–
19	0.5 ± 0.05	0.6 ± 0.06	0.2 ± 0.09	–
20	0.6 ± 0.06	0.7 ± 0.07	0.2 ± 0.02	–
21	0.6 ± 0.06	0.3 ± 0.03	0.2 ± 0.02	0.3 ± 0.03
22	0.5 ± 0.05	0.3 ± 0.03	0.2 ± 0.02	0.6 ± 0.06
23 – 25	0.4 ± 0.04	0.3 ± 0.03	0.4 ± 0.04	0.7 ± 0.07
26	0.4 ± 0.04	0.3 ± 0.03	0.4 ± 0.04	0.7 ± 0.07
27	0.4 ± 0.04	0.3 ± 0.03	0.4 ± 0.04	0.8 ± 0.08
28	0.3 ± 0.03	0.3 ± 0.03	0.4 ± 0.04	0.3 ± 0.03
29	0.3 ± 0.03	0.3 ± 0.03	0.4 ± 0.04	0.3 ± 0.03
30 – 33	0.2 ± 0.02	0.3 ± 0.03	0.4 ± 0.04	–
34	0.1 ± 0.01	0.2 ± 0.02	–	–

Табл. 2 Скорости деления клеток культуры *I. galbana*, адаптированных к CPCC,  $\mu$ , число делений / сутки  
Table 2 Growth rates of *I. galbana* culture adapted to different light quality,  $\mu$ , number of divisions / day

После второго разбавления накопительных культур водорослей *I. galbana* питательной средой, скорости деления клеток в культурах, адаптированных к свету разного спектрального состава в экспоненциальной фазе роста достоверно не отличались (табл. 3), но были меньше,

чем после первого разведения (табл. 2), и в 2 раза меньше, чем в начале эксперимента (см. табл. 1). При этом на седьмые сутки после разведения водоросли на красном свете прекратили свой рост, а на синем, зелёном и белом свету клетки продолжали делиться (рис. 4).

Сутки	Свет			
	Белый	Красный	Синий	Зелёный
35	0.4 ± 0.04	0.3 ± 0.03	0.3 ± 0.03	0.2 ± 0.02
36 – 39	0.5 ± 0.05	0.3 ± 0.03	0.5 ± 0.05	0.4 ± 0.04
40	0.5 ± 0.05	0.5 ± 0.05	0.6 ± 0.06	0.6 ± 0.06
41	0.5 ± 0.05	0	0.4 ± 0.04	0.6 ± 0.06
42	0.5 ± 0.05	0	0.4 ± 0.04	0.6 ± 0.06
43	–	0	0.3 ± 0.03	0.4 ± 0.04

Табл. 3 Скорости деления клеток культуры *I. galbana*, адаптированных к CPCC,  $\mu$ , число делений / сутки  
Table 3 Growth rates of *I. galbana* culture adapted to different light quality,  $\mu$ , number of division / day

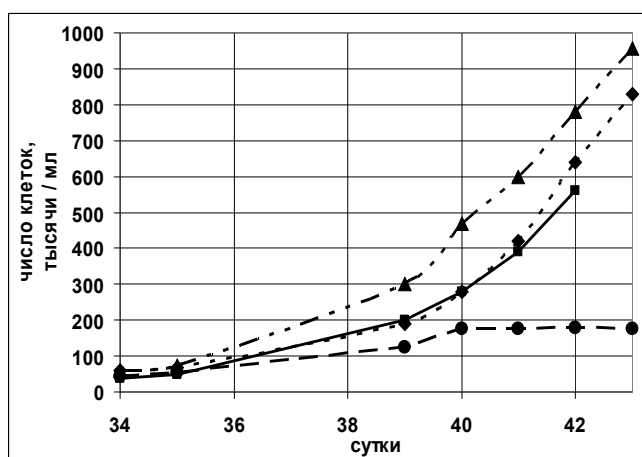


Рис. 4 Динамика концентрации клеток культуры водорослей *I. galbana* в 35 – 43 сутки (■ — белый, ● — красный, ▲ — синий, ◆ — зелёный)  
Fig. 4 The dynamics of *I. galbana* cell concentration on the 35 – 43<sup>th</sup> days (■ — white, ● — red, ▲ — blue, ◆ — green)

Поглощение света пигментами водорослей. Спектрально-специфический коэффициент поглощения света, нормированный на содержание ХЛ *a* ( $\alpha_{ph/chl}^*$ ) и рассчитанный с учётом спектральных характеристик света, различался для культур, адаптированных к белому, синему и красному свету. Наибольшие значения  $\alpha_{ph/chl}^*$  были при адаптации к синему свету, а наименьшие — к красному. На белом и зелёном свету величины  $\alpha_{ph/chl}^*$  совпадали. Удельные коэффициенты поглощения света клетками водорослей, нормированные на содержание ХЛ *a* ( $\alpha_{ph/chl}(\lambda)$ ) на длинах волн 440 нм и 678 нм, в обоих экспериментах существенно не отличались в зависимости от спектрального состава света адаптации. Средние по спектру удельные коэффициенты поглощения света водорослями, нормированные на содержание ХЛ *a*, также варьировали незначительно (табл. 4).

Табл. 4 Коэффициенты поглощения света клетками культуры водорослей *I. galbana*, нормированные на содержание ХЛ *a*, при адаптации к различному спектральному составу света

Table 4 Chl *a*-specific light absorption coefficients for *I. galbana* adapted to the different spectral composition of light

Параметры	Дни адаптации	Свет			
		Белый	Красный	Синий	Зелёный
$\alpha_{ph/chl}^*$ , м <sup>2</sup> / мг ХЛ <i>a</i>	4 – 5	0.013 ± 0.001	0.008 ± 0.001	0.028 ± 0.001	0.014 ± 0.002
$\alpha_{ph/chl}$ (678), м <sup>2</sup> / мг ХЛ <i>a</i>	4 – 5	0.016 ± 0.001	0.018 ± 0.001	0.017 ± 0.001	0.015 ± 0.001
	40	0.019 ± 0.002	0.018 ± 0.002	0.019 ± 0.002	0.023 ± 0.002
$\alpha_{ph/chl}$ (440), м <sup>2</sup> / мг ХЛ <i>a</i>	4 – 5	0.030 ± 0.003	0.033 ± 0.003	0.033 ± 0.003	0.027 ± 0.003
	40	0.031 ± 0.003	0.029 ± 0.003	0.036 ± 0.003	0.038 ± 0.003
Среднее по спектру	4 – 5	0.013 ± 0.001	0.015 ± 0.001	0.015 ± 0.001	0.013 ± 0.001
$\alpha_{ph/chl}$ , м <sup>2</sup> / мг ХЛ <i>a</i>	40	0.016 ± 0.001	0.015 ± 0.001	0.016 ± 0.001	0.018 ± 0.001
$\alpha_{ph}$ (440) / $\alpha_{ph}$ (678)	4 – 5	1.9 ± 0.2	1.8 ± 0.2	1.9 ± 0.2	1.8 ± 0.2
	40	1.6 ± 0.2	1.6 ± 0.2	1.9 ± 0.2	1.7 ± 0.2

Для сравнения форм спектров коэффициентов поглощения света клетками водорослей нормировали на величину в красном максимуме ( $\alpha_{ph}(\lambda) = 100$ , для  $\lambda = 678$  нм) (рис. 5). Очевидно, что формы спектров удельных коэффи-

циенты поглощения света водорослями практически не различались при адаптации культур к свету различного спектрального состава, как в начале, так и в конце эксперимента (рис. 5).

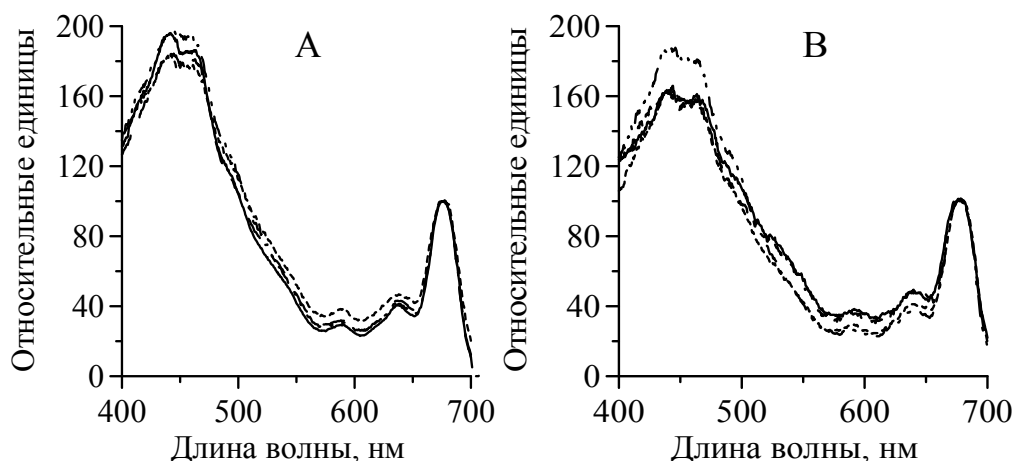


Рис. 5 Спектры нормированных коэффициентов поглощения света пигментами клеток культуры *I. galbana* при адаптации к различному спектральному составу света (— белый, -- красный, — · — синий, - - - - зелёный): А – на 4–5-й, В – на 40-й день (6-й день после разбавления накопительной культуры питательной средой)

Fig. 5 The spectra of specific light absorption of *I. galbana* culture adapted to the different light qualities (— white, - - - - red, — · — blue, - - - - green): А – on the 4–5<sup>th</sup>, В – on the 40<sup>th</sup> day (6<sup>th</sup> day after dilution of bath culture by culture medium)

Соответствующие отношения величин коэффициентов поглощения света пигментами клеток культуры водорослей *I. galbana* на длинах волн 440 и 678 нм для белого, красного, зелёного и синего цветов адаптации составили  $1.8 \pm 0.2$  (табл. 4).

Содержание органического углерода и азота в клетке, и отношение органического углерода к ХЛ *a* в клетках. Количество внутри-

клеточного углерода С и азота N в клетках культуры водорослей *I. galbana* в зависимости от адаптации к различному спектральному составу света представлено в табл. 5. Было отмечено уменьшение на 35 % количества С в клетках при адаптации к зелёному свету и на 40 % при адаптации к синему свету. Также было отмечено уменьшение и количества N в клетках при адаптации к зелёному свету на 22 %, что не

является значимым изменением, и при адаптации к синему свету на 37 % по отношению к белому свету. При адаптации к красному свету значимых изменений внутриклеточного содержания С и N по отношению к белому свету не произошло. При этом отношение С / N в клетках культуры *I. galbana* при всех вариантах хроматической адаптации достоверно не раз-

личалось и составляло в среднем  $5.9 \pm 0.5$  (табл. 5).

Отношения С / ХЛ *a* в клетках культуры водорослей *I. galbana*, адаптированной к синему, зелёному и красному свету, слабо отличалось от значений, полученных для контрольной культуры, выращенной на белом свету (табл. 5).

Параметры	Свет			
	Белый	Красный	Синий	Зелёный
С, пг / клетка	$17 \pm 1$	$14 \pm 1$	$10 \pm 1$	$11 \pm 1$
N, пг / клетка	$2.7 \pm 0.3$	$2.3 \pm 0.2$	$1.7 \pm 0.1$	$2.1 \pm 0.1$
С / N, пг / пг	$6.3 \pm 0.6$	$6.1 \pm 0.6$	$5.9 \pm 0.6$	$5.2 \pm 0.6$
С / ХЛ <sub>a</sub> , пг / пг	$57 \pm 6$	$47 \pm 5$	$61 \pm 6$	$60 \pm 6$

Табл. 5 Содержание органического С и N в клетке и отношение С / ХЛ *a* при адаптации культуры *I. galbana* к различному спектральному составу света  
Table 5 The carbon and nitrogen content and carbon / chl *a* ratio in the cells of *I. galbana* culture adapted to the different spectral composition of light

**Обсуждение.** Изменения концентрации пигментов в клетках водорослей в зависимости от спектрального состава света часто рассматривают в рамках теории «комплиментарной хроматической адаптации» (КХА), которая предполагает увеличение в клетках водорослей концентрации тех пигментов, полоса поглощения которых совпадает со спектром падающего света, и уменьшение концентрации пигментов, не поглощающих свет данного спектрального состава [5]. В наших исследованиях с *I. galbana* теория КХА не нашла своего подтверждения [1]: изменения отношения пигментов суммарных каротиноидов (КР) к ХЛ *a* в клетках при адаптации к СРСС не отмечено.

Спектры поглощения света водорослями  $\alpha_{ph}$  ( $\lambda$ ) имеют два основных максимума в «синей» и «красной» частях спектра видимого излучения. Удельные коэффициенты поглощения света на длинах волн 440 и 678 нм, нормированные на содержание ХЛ *a* ( $\alpha_{ph/chl}$  ( $\lambda$ )), и их отношение  $\alpha_{ph/chl}(440) / \alpha_{ph/chl}(678)$  являются основными характеристиками спектров поглощения света фитопланктоном [13]. Адаптационной реакцией водорослей на действие СРСС могло бы быть изменение их светопоглощающей способности. Однако поглощение света в данных диапазонах обусловлено основным пигментом водорослей ХЛ *a* и вспомогательными пигментами КР. И так как в относитель-

ном содержании пигментов суммарные КР / ХЛ *a* в клетках культуры *I. galbana* не изменились, то соответственно не было и изменений в поглощении света клетками.

Физиологическая адаптация водорослей к особенностям спектрального состава света также может сопровождаться количественными и качественными изменениями в углеводах, аминокислотах, органических кислотах и протеинах, образуемых за счёт метаболизма  $CO_2$ . В эвфотической зоне озёр и океанов химический состав водорослей может изменяться с увеличением глубины обитания в результате дифференциального поглощения света различных длин волн. Клетки, обитающие в нижней части эвфотической зоны, подвергаются облучению преимущественно синим светом, который, вероятно, способствует увеличению синтеза протеина [10]. Природа продуктов фотосинтеза может, в свою очередь, влиять на качество и количество продуктов распада и растворённого органического вещества, выделяемых водорослями в окружающую среду. Об изменении в химическом составе водорослей можно судить по отношению С / N, являющихся основными структурными элементами углеводов и белков.

Имеются данные о содержании N в клетках *Prymnesium parvum* при адаптации к СРСС: наибольшие содержания N в клетках наблюдались на зелёном свету (увеличение на

30 % по сравнению с белым светом), на синем свету они не отличались от таковых на белом свету, и на 43 % уменьшились при адаптации к красному свету [14]. В цитируемой работе клетки культуры *P. parvum* адаптировались к одинаковой величине общей фотосинтетически активной радиации (PAR), падающей на поверхность клеток. Однако для участия в процессе фотосинтеза фотоны должны быть поглощены пигментами водорослей, т.е. следует определять фотосинтетически используемую радиацию (PUR), как часть энергии, которая поглощается пигментами водорослей. PUR зависит от пигментного состава культуры водорослей, удельных коэффициентов поглощения света пигментами и от спектрального состава падающей световой энергии. Поскольку в [14] клетки культуры *P. parvum* адаптировались к свету одинаковой PAR, но разных PUR, то в данном случае нет основания делать вывод о влиянии CPCC на накопление в клетках азота (увеличение синтеза белков).

В нашем исследовании клетки культуры *I. galbana* адаптировались к спектрально различному свету с разной величиной PAR, но одинаковой PUR. Измерение внутриклеточного содержания С и N показало, что содержание С в клетках уменьшалось только при адаптациях к синему и зелёному свету. При этом отмечено изменение внутриклеточного содержания ХЛ а и уменьшение внутриклеточного содержания N. Таким образом, отношение С / N на свету разного спектрального состава оставалось постоянным, что позволяет сделать вывод о постоянстве направленности биосинтеза клетки в условиях различного спектрального освещения.

Важным показателем продуктивности и роста водорослей является отношение С / ХЛ а, которое в фитопланктоне подвержено значительной пространственно-временной изменчивости [15]. Данных же о влиянии CPCC на отношение С / ХЛ а практически нет. На примере диатомовой *Skeletonema costatum* показано, что отношение С / ХЛ а увеличивалось с увеличе-

нием освещённости, при этом на синем, зелёном и белом свету отношения С / ХЛ а были выше, чем на красном и жёлтом [9]. Однако авторы отметили, что данное адаптационное изменение отношения С / ХЛ а в клетках культуры *S. costatum* связано не со спектральными характеристиками падающего света, а с количеством поглощённого света, нормированного на единицу ХЛ а. То есть, отношение С / ХЛ а в клетках культуры *S. costatum* увеличивалось по мере увеличения света, поглощённого на единицу ХЛ а, и практически может считаться линейной функцией от КПК, независимо от CPCC [9]. Таким образом, на примере диатомовой водоросли *S. costatum* установлено, что CPCC не влиял на отношение С / ХЛ а. В нашем исследовании с примнезиофитовой культурой *I. galbana*, как и в работе с диатомовой [9], также не выявлено зависимости отношения С / ХЛ а от спектрального состава света.

Скорость роста водорослей ( $\mu$ ), как известно, является гиперболической функцией от PAR [15]. Влияние же CPCC на  $\mu$  водорослей различных классов изучено на единичных видах. Так, в опытах с *Prymnesium parvum* величина  $\mu$  на синем свету не изменялась по сравнению с белым светом, а на зелёном и красном свету уменьшилась [14]. У *Emiliania huxleyi* сине-зелёный свет вызвал уменьшение  $\mu$  [11]. Однако, как описано выше, опыты проводились при одинаковой PAR, то есть фактически количество поглощённых клетками квантов света различалось для цветных источников облучения. Следовательно, клетки водорослей были под влиянием как качества, так и количества света, что не позволяет отделить хроматическую составляющую адаптации клеток. В наших же экспериментах с *I. galbana*, построенных по принципу равенства PUR, скорость роста клеток не зависела от спектрального состава света.

**Выводы. 1.** Адаптация водорослей *I. galbana* к свету различного спектрального состава не приводила к изменению формы спектров и коэффициентов поглощения света пигментами клеток. **2.** Содержание С и N в

клетках водорослей снизилось на синем и зелёном свете по отношению к белому свету. **3.** Отношение C / ХЛ *a* не зависело от спектрального состава падающего света. **4.** Скорости деления клеток *I. galbana* на белом, синем, зелёном и красном свете были примерно равны.

1. Ефимова Т. В. Влияние спектрального состава света на содержание пигментов в клетках микроводорослей // Морск. экол. журн. – 2011. – Отд. вып. № 2. – С. 22 – 28.
2. Кабанова Ю. Г. Органический фосфор, как источник питания фитопланктона: автореф. дис...канд. биол. наук. – М., 1958. – 25 с.
3. Маньковский В. И. Основы оптики океана – Севастополь, 1996. – 119 с.
4. Bricaud A., Morel A. MERIS potential for ocean color studies in the open ocean // Int. J. Remote Sensing. – 1999 – 20, No. 9. – P. 1757 – 1769.
5. Kirk J. T. O. Light and photosynthesis in aquatic ecosystems. Second edition. – Cambridge Univ. Press. Cambridge, 1993. – 509 p.
6. *Methods of seawater analysis* / ed. by K. Grasshoff, M. Ehrhardt, K. Kremling. – 2, rev. Ans extended ed. – Weinheim; Deerfield Beach, Florida; Basel: Verlag Chemie. – 1983. – 419 p.
7. Mitchell B. G. Algorithms for determining the absorption coefficient of aquatic particulates using the quantitative filter technique (QFT) // In: Ocean Optics X/R. Spinrad editor. SPIE Bellingham. Washington. – 1990. – P. 137 – 148.
8. Morel A. Available, usable, and stored radiant energy in relation to marine photosynthesis // Deep-Sea Res. – 1978. – 25. – P. 673 – 688.
9. Nielsen M. V., Sakshaug E. Photobiological studies of *Skeletonema costatum* adapted to spectrally different light regimes // Limnol. Oceanogr. – 1993. – 38, No. 7. – P. 1576 – 1581.

**Вплив спектрального складу світла на фотобіологічні характеристики водорості *Isochrysis galbana*.** Т. В. Єфімова. У прімінезіофітової водорості *Isochrysis galbana* при адаптації до синього та зеленого світла зменшився вміст вуглецю і азоту в клітинах по відношенню до білого світла. Швидкості ділення клітин на білому, синьому, зеленому і червоному світлі були приблизно рівні. Дія спектрального складу світла так само не впливала на поглинання водоростями світла, співвідношення органічного вуглецю до азоту в клітинах і вміст пігменту ХЛ *a* в органічній речовині.

**Ключові слова:** микроводорості, хроматична адаптація, швидкість ділення клітин, поглинання світла пігментами, співвідношення C / ХЛ *a*

**The effect of spectral light composition on photobiological characteristics of alga *Isochrysis galbana*.** T. V. Iefimova. The carbon and nitrogen contents in the cells of *Isochrysis galbana* culture were decreased during the adaptation to blue and green light, in relation to white light. Growth rates were approximately equal on the white, blue, green and red light. The spectral light composition also did not influence on light absorption by algae, organic carbon / nitrogen ratio and carbon / pigment chl *a* ratio in the cells of *I. galbana* culture.

**Key words:** microalgae, chromatic adaptation, growth rates, light absorption by algae, C / Chl *a* ratio

**Благодарности.** Искренне благодарна О. А. Галатовой за выращивание культуры микроводорослей, использованной в эксперименте, а также А. И. Акимову за помощь в постановке лабораторных экспериментов, А. Б. Кожемяке за помощь в определении содержания N и C в клетках водорослей.

10. Prezelin B. B., Tilzer M. M., Schofield O., et al. The control of the production process of phytoplankton by the physical structure of the aquatic environment with special reference to its optical properties // Aquatic Sciences – 1991. – 53, 2/3 – P. 136 – 186.
11. Schofield O. R., Bidigare R., Prezelin B. Spectral photosynthesis, quantum yield and blue-green light enhancement of productivity rates in the diatom *Chaetoceros gracile* and the prymnesiophyte *Emiliana huxleyi* // Mar. Ecol. Prog. Ser. – 1990. – 64. – P. 175 – 186.
12. Vesik M., Jeffrey S. W. Effect of blue-green light on photosynthetic pigments and chloroplast structure in unicellular marine algae from six classes // J. Phycol. – 1977. – 13, No. 3. – P. 280 – 288.
13. Wozniak B., Dera J., Koblentz–Mishke O. J. Modeling the relationship between primary production, optical properties and nutrients in the sea (as a basis for indirectly estimating primary production) // Ocean Optics XI – 1992. – 1750. – P. 246 – 275.
14. Wynne D., Rhee G. Y. Effects of light intensity and quality on the relative N and P requirements (the optimum N : P ratio) of marine algae // J. Plankton Res. – 1986. – 8. – P. 91 – 103.
15. Zonneveld C. Light-limited microalgal growth: a comparison of modelling approaches // Ecol. Modelling. – 1998. – 113 – P. 41 – 54.

Поступила 07 сентября 2012 г.  
После доработки 16 августа 2013 г.