

УДК 577.344.3:57.084.1:586.1:582.263

DOI 10.29039/2413-1725-2023-9-1-119-130

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВЕТОДИОДНОГО ОСВЕЩЕНИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ БИОМАССЫ, БЕЛКОВЫЙ И ПИГМЕНТНЫЙ СОСТАВ ХЛОРЕЛЛЫ

Князева О. Е.¹, Сосновский Е. С.², Моисеева И. Я.², Кузнецова А. В.²,
Полубояринов П. А.², Семенова Е. Ф.³

¹Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза, Россия

²Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

³ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь,
Республика Крым, Россия

E-mail: sef1957@mail.ru

Исследована динамика роста штамма *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111, изменения белкового и пигментного состава культуры в зависимости от спектральных характеристик источника освещения в биореакторе. При освещении длинноволновым красным светом отмечен максимальный прирост биомассы (в 5–7 раз) и накопление хлорофилла *a* – основного пигмента фотосинтеза. Выращивание хлореллы при синем свете вызывало наибольшее накопление клеточного белка, в основном, за счет увеличения фракции глутелинов. Спектральный состав света влиял на содержание как хлорофиллов, так и каротиноидов. Содержание хлорофилла *a* незначительно повышалось при действии красного света по сравнению с синим и снижалось почти в 2 раза при выращивании в условиях освещения светодиодами (красный + синий, 1:1) и фиолетовыми "полного спектра". Сделан вывод о том, что использование и преобразование хлореллой света является интегральным процессом, который характеризуется совокупностью эффектов. Результаты исследования имеют важное значение для обоснования и реализации концепции эффективного биотехнологического производства биомассы хлореллы.

Ключевые слова: хлорелла, фотобиореактор, светодиод, каротины, ксантофиллы, хлорофилл, пигменты, белки.

ВВЕДЕНИЕ

Микроводоросли – быстрорастущие организмы, источник различных соединений для пищевой и фармацевтической промышленности, имеющие выдающийся потенциал в отношении новых биологически активных веществ [1]. Хлорелла является фотоавтотрофной культурой, свет необходим для ее жизнедеятельности, а продукция метаболитов зависит от характеристик источника света [2], следовательно, решающее значение для оптимального культивирования имеет создание фотобиореактора, разработка энергосберегающей технологии процесса [3].

Существует два способа культивирования микроводорослей – открытые системы и закрытые управляемые фотобиореакторы [4]. В фотобиореакторах, в

отличие от открытых водоемов, перемешивание, однородность среды и освещение могут быть более контролируемы, так что достигается большее накопление биомассы. Важное значение для контролируемого процесса имеет световой режим – спектральный состав света, уровень и продолжительность освещенности. Перспективным источником излучения в настоящее время являются светодиоды. Они позволяют получать практически любой спектральный состав за счет комбинации светодиодов различных цветов. Следует отметить и другие преимущества светодиодов – малая мощность (низкое энергопотребление), высокая светоотдача и направленность.

Биотехнологи исследовали параметры массового производства микроводорослей – различные типы фотобиореакторов и режимы освещения [5]. Wang et al. исследовали влияние различных светодиодов на скорость роста *Spirulina platensis* и обнаружили наибольший прирост биомассы при освещении красным светодиодом и меньший при освещении синим светом [6]. Низкую эффективность синего света связывали с тем, что полосы поглощения хлорофилла обычно расположены вне синих длин волн. Yongjun Zhao исследовал влияние различных длин волн светодиодного света на выработку биогаза хлореллой и также обнаружил, что красный свет оптимален для роста хлореллы и накопления биогаза [7]. Впоследствии было показано, что накопление хлорофилла в среде культивирования *Chlorella* больше при освещении красными светодиодами, в то время как продуктивность в отношении выработки биомассы и удельной скорости роста выше при освещении белым светом. Авторы рекомендовали красные светодиоды (с низким энергопотреблением) для стимулирования фотосинтеза хлореллы, а белые – для увеличения производства биомассы в течение более длительного времени [8].

Микроводоросли, как все зеленые растения, содержат фотосинтезирующие пигменты, главная функция которых – поглощение световой энергии. Пигменты в клетках находятся в комплексе с белками, образуя так называемые пигмент-белковые комплексы, локализованные в тиллакоидах, которые расположены в хлоропластах клеток [9]. Учет режима освещения, адаптация условий культивирования к конкретным требованиям биообъекта имеет важное значение для разработки контролируемого биотехнологического процесса культивирования водорослей [10].

Уникальные технологические преимущества светодиодов (малый размер, экономичность, узкий спектральный диапазон) открывают широкие перспективы их использования. Однако влияние монохроматического света на рост и метаболизм водоросли хлореллы изучены недостаточно.

Целью работы было исследовать динамику роста и изменения белкового и пигментного состава в зависимости от спектральных характеристик источника освещения. Интерес представляло проследить возможную адаптивную роль фотосинтетических пигментов – хлорофиллов *a* и *b*, каротиноидов и ксантофиллов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовали планктонный штамм одноклеточной водоросли *Chlorella vulgaris* ИФР №С-111. Растворы для питательной среды готовились согласно ТУ [11].

Маточную культуру суспензии хлореллы вносили в термостатируемый биореактор объемом 6 л в количестве 20 % от объема ёмкости. Оставшийся объём заполняли питательной средой. Хлореллу культивировали в течение 5–6 суток при различных вариантах освещения (рис. 1, табл. 1). Культивирование хлореллы проводили в фотобиореакторе в течение 3–4 последовательных циклов. Каждый цикл включал 10 ч освещения светодиодами и 14 ч темного периода.

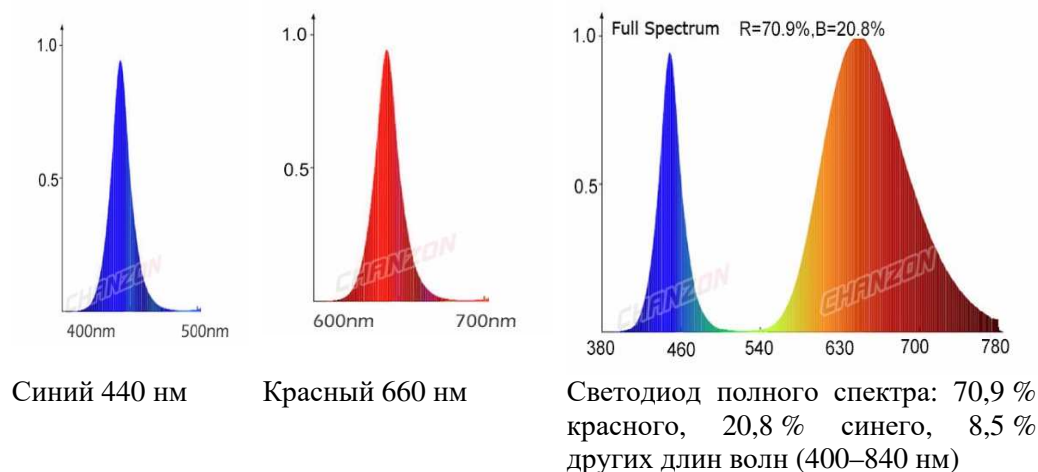


Рис. 1. Спектральные характеристики используемых светодиодов.

Таблица 1

Варианты освещения при выращивании хлореллы

№ варианта	Светодиоды (LED)	Длина волны, нм	Ширина спектра, нм	Световой поток, лм	Световая отдача, лм/Вт	Мощность, Вт (Вт/л)
1	6 красных светодиодов 3GR-R	650–670	20	25–35	29,8–41,7	6 (1)
2	6 синих светодиодов	430–450	20	15–25	12,6–21	6 (1)
3	3 красных + 3 синих светодиодов					6 (1)
4	светодиод полного спектра (Full spectrum)	Параметры см. рис. 1		20–30	16,8–25,2	6 (1)

Для оценки накопления биомассы ежедневно проводили подсчет клеток в гемоцитометре и измеряли оптическую плотность на фотометре КФК-3-01 при 400 нм. Концентрацию суспензии хлореллы (N) в клетках на 1 мл рассчитывали по формуле $N = kD$, где N – количество клеток, k – коэффициент пропорциональности (1134000), D – оптическая плотность.

Биомассу отделяли от культуральной среды центрифугированием (5000 об/мин, 5 мин). Около 0,5 г (точная навеска) сырой биомассы хлореллы анализировали на содержание белков и пигментов. Дезинтеграцию клеточной оболочки хлореллы проводили механически (растирание с кварцевым песком). Пигменты экстрагировали смесью этанол-ацетон (3:1) (2*5мл) и разделяли методом ТСХ. Остаток после экстракции пигментов анализировали на содержание белковых фракций [12] по методике Ермакова-Дурыниной [13]. Различными растворителями (ледяная вода, 5 % раствор K_2SO_4 , 70 % этанол, 0,2 % NaOH) последовательно извлекали альбумины, глобулины, проламины и глютелины. Концентрацию белка в клетках хлореллы определяли по калибровочной кривой, метод Бредфорд [14].

Пигменты разделяли на пластинах Sorbfil (ТУ26-11-17-89) в системе петролейный эфир – этилацетат – изопропанол – хлороформ (7,5:1,8:0,7:0,5), объем нанесения – 100 мкл. Окрашенные фракции силикагеля, содержащие хлорофиллы *a* и *b*, каротины и ксантофилы, экстрагировали ацетоном (4 мл), центрифугировали и анализировали спектрофотометрически. Концентрацию пигментов рассчитывали с учетом удельных коэффициентов поглощения $E(450)$ (каротина) = 236, $E(445)$ (ксантофила) = 215, $E(662)$ (хлорофилла *a*) = 104,5, $E(644)$ (хлорофилла *b*) = 47,7 [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Микроводоросли – фотоавтотрофные организмы, способные утилизировать световую энергию, аккумулировать органические и неорганические соединения. На первом этапе исследований изучены процессы накопления биомассы в зависимости от режима освещения.

Влияние спектрального состава освещения на рост биомассы хлореллы. Так как для зеленых растений эффективность фотосинтеза зависит от длины волны падающего излучения, в основе выбора длин волн источников освещения зеленых растений лежит представление о важности двух полос – в синей (440 нм) и красной областях (660 нм) спектра [16], соответствующих максимумам поглощения каротиноидов и хлорофиллов, соответственно. Зеленый свет имеет низкую эффективность из-за высокого отражения его хлорофиллом.

Для определения накопления биомассы хлореллы в качестве стандартного метода использовали прямой подсчет клеток в камере Горяева и косвенный оптический метод (измерение поглощения при 400 нм на КФК). В общем, рост хлореллы согласуется со стандартной кривой роста периодической культуры микроорганизмов. Отмечаются лаг-фаза (привыкание), фаза роста и достижение стационарной фазы. Показано, что прирост оптической плотности согласуется с увеличением числа клеток. Данный метод более предпочтителен, так как не требует

долгих и утомительных операций и особенно удобен для оценки скорости роста, когда не требуются абсолютные значения концентрации клеток.

Обнаружено, что спектральный состав света оказывал влияние на процессы роста и развития хлореллы (рис. 2).

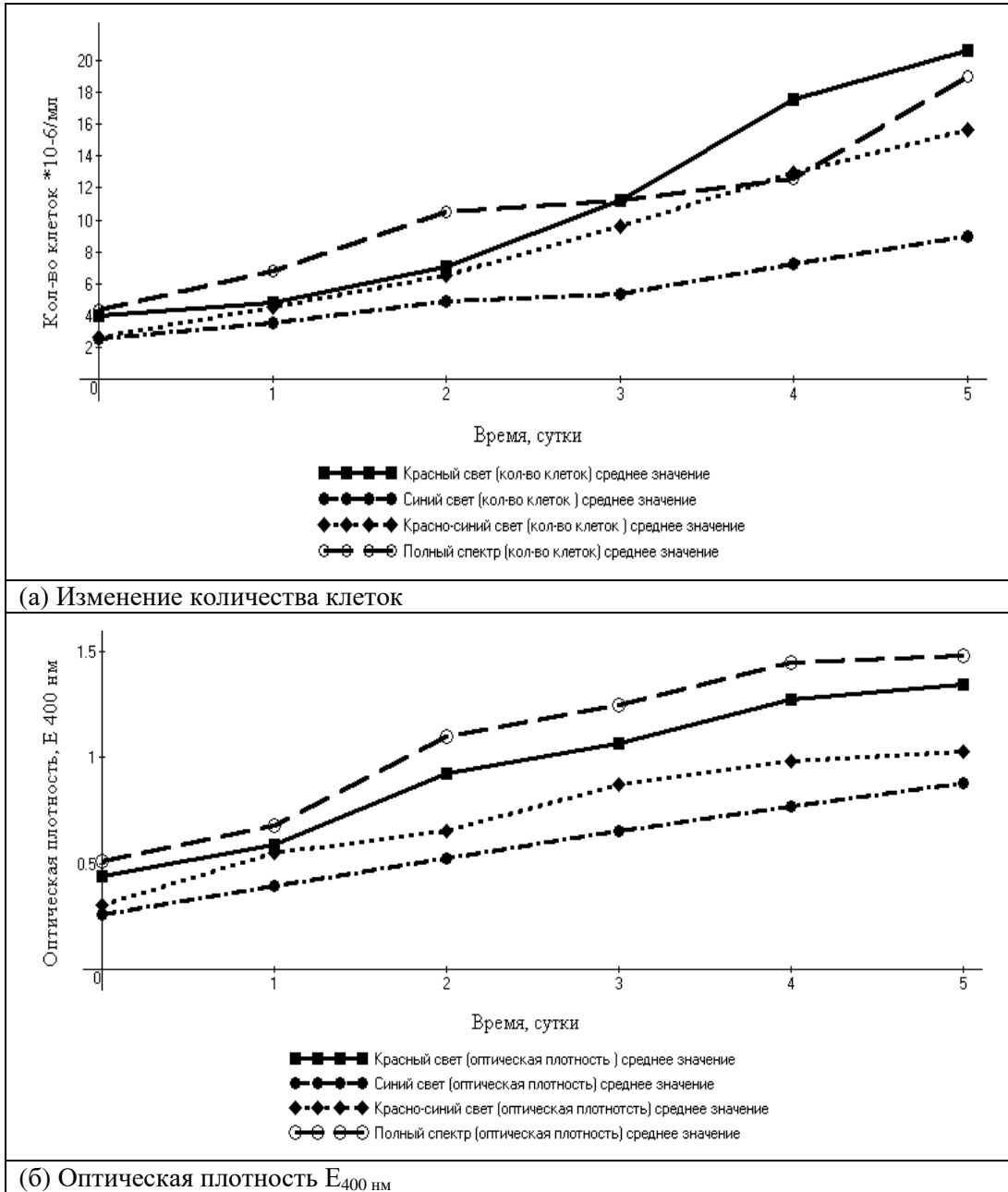


Рис. 2. Накопление биомассы хлореллы при различных вариантах освещения.

Так, наиболее активный рост биомассы с 5–7-кратным увеличением числа клеток (от 3-5 до $25 \cdot 10^6$), наблюдался при освещении светодиодами красного света и «полного спектра – full spectrum». Полный спектр – это пурпурные LED с соотношением красного и синего света (70:20). Наименьшие темпы прироста биомассы наблюдали при освещении синим светом. Вероятно, с точки зрения количества фотонов, поглощаемых хлореллой в процессе культивирования, наиболее эффективным является красный свет (660 нм), что связано с большей активацией системы фитохромов при освещении с большей долей красного излучения относительно синего.

Таким образом, облучение красным светом (660 нм) явно оказывало стимулирующее действие на продукцию биомассы хлореллы. В связи с этим, интересным представлялось исследовать биохимические показатели микроводоросли – продукцию первичных и вторичных метаболитов (белков и пигментов).

Влияние спектрального состава освещения на продукцию белка и соотношение белковых фракций. Известно, что биомасса хлореллы – ценный источник белков, аминокислот, витаминов и пигментов. Биологическая ценность белков во многом зависит от состава и соотношения белковых фракций. Хлорелла – быстрорастущий организм с интенсивными процессами углеводного и азотистого обмена, поэтому анализ белкового состава хлореллы при различных условиях облучения представляет интерес как исследование механизмов устойчивости и адаптации.

Обнаружено, что наиболее активно накопление белка (до 23 % биомассы) происходит при освещении коротковолновым синим светом (рис. 3). При оптимальном для выращивания растений "полном спектре" продукция белка снижается до 6–7 %, что, вероятно, связано с активацией процессов роста, деления клеток, и как следствие, недостатком азота и изменением азотистого метаболизма.

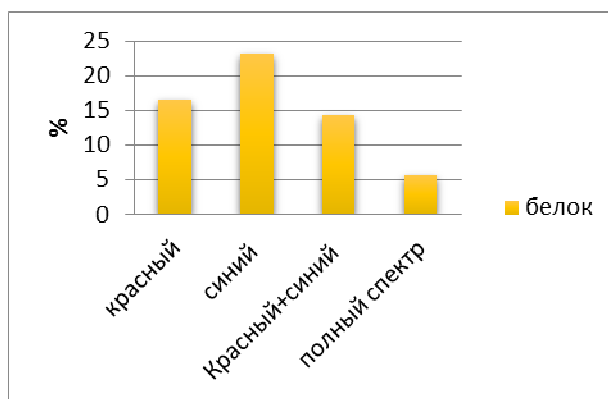


Рис. 3. Накопление белка в клетках хлореллы при различных вариантах светодиодного освещения.

По классификации Осборна, с различными модификациями [12] растительные белки разделяют по различной растворимости в воде, солевых и спиртовых

растворах. Обнаружено, что спектральный состав источников света влияет на соотношение белковых фракций хлорелла (табл. 2, рис. 4). Наибольшие изменения наблюдались в содержании глютениновой фракции белков, растворимых только в растворах щелочей (от 0,164 мг/мл при освещении светодиодами "полного спектра" до 0,665 мг/мл при синем свете с длиной волны 440 нм). Глютенины рассматриваются как гетерогенная смесь клеточных белков, полученных путем извлечения разбавленной щелочью остатка после удаления альбуминов, глобулинов, проламинов. Известно, что у стрессоустойчивых растений содержание глютенинов повышено [17].

Таблица 2
Состав белковых фракций хлореллы при различных вариантах освещения

Фракции белков	Концентрация белка, мг/мл			
	Красные светодиоды (вариант 1)	Синие светодиоды (вариант 2)	Красные+синие светодиоды (вариант 3)	Светодиоды полного спектра (вариант 4)
Альбумины	0,147±0,007	0,122±0,005	0,148±0,009	0,057±0,009
Глобулины	0,068±0,003	0,053±0,002	0,083±0,008	0,016±0,004
Проламины	0,042±0,002	0,045±0,006	0,037±0,006	0,044±0,003
Глютенины	0,567±0,012	0,665±0,016	0,447±0,033	0,164±0,011
Сумма белковых фракций	0,824±0,025	0,884±0,028	0,714±0,051	0,279±0,020

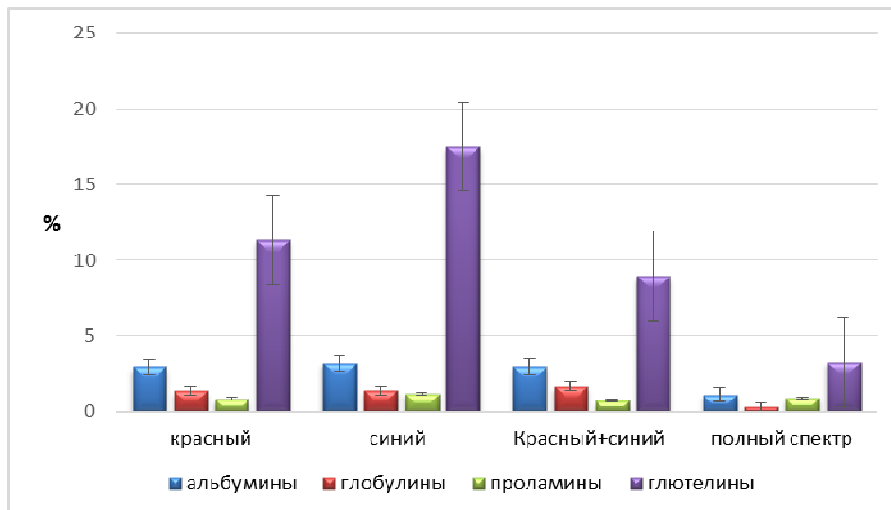


Рис. 4. Фракции белков хлореллы при различных вариантах освещения.

Практически не влиял спектральный состав освещения на содержание проламинов, спирторастворимых белков, отличающихся относительно малым содержанием ряда незаменимых аминокислот (особенно лизина и триптофана) и богатых пролином. Проламины – эволюционно молодые высокоспециализированные запасные белки растений, их накопление обычно активируется в процессе прорастания или адаптации.

Наиболее высокое биологическое значение (оптимальное соотношение незаменимых аминокислот) имеет водорастворимая альбуминовая фракция. Максимальное накопление альбуминов отмечено при освещении красными и сочетании красных и синих светодиодов (до 0,148 мг/мл). При освещении "полным спектром" содержание альбуминовой фракции количественно снижается до 0,057 мг/мл, однако, в процентном соотношении доля альбуминов оказывается выше, чем при освещении красным, синим светом и их комбинациями.

Таким образом, выращивание хлореллы с использованием синего освещения приводит к увеличению содержания общего белка. При освещении красным светом и оптимальным "полным спектром", т.е. в условиях, благоприятным для накопления биомассы содержание белка снижается, вероятно, вследствие отставания скорости процессов биосинтеза белка от интенсивности деления клеток.

Влияние спектрального состава освещения на пигментные системы хлореллы. Свет – важнейший источник энергии для хлореллы – зеленой микроводоросли. Представлялось интересным исследование влияния спектрального состава освещения на пигментный состав микроводоросли. Во всех фотосинтезирующих организмах первичное поглощение световой энергии происходит с участием светособирающих антенн (фотоантенн). Фотоантенны – сложные супрамолекулярные комплексы, состоящие из пигментов-хромофоров и окружающих их белков, выполняют светособирающую функцию, поглощают энергию квантов света, и передают ее в реакционный центр [18]. Реакционный центр – другой супрамолекулярный комплекс, в котором молекулы хлорофилла *a* участвуют в реакциях фотосинтеза с использованием энергии, полученной по антенне.

Обнаружено (табл. 3, рис. 5), что наибольшее количество хлорофилла *a* (до 2,5 мг/г биомассы) наблюдается при выращивании хлореллы при красном освещении, меньше – при синем освещении (2,1 мг/г), при полном спектре (0,95 мг/г) и минимальное – при биколорном освещении (0,84 мг/г).

Таблица 3

Влияние спектрального состава освещения на пигментный состав хлореллы

Содержание пигментов, мг/г	Спектральный состав освещения			
	Красный	Синий	Красный + синий	Полный
Каротин	0,35±0,01	0,176±0,003	0,078±0,0008	0,162±0,003
Ксантофилл	1,42±0,07	1,47±0,07	1,39±0,06	0,76±0,03
Хлорофилл <i>a</i>	2,40±0,16	2,1±0,1	0,84±0,03	0,95±0,04
Хлорофилл <i>b</i>	2,46±0,17	1,9±0,1	1,47±0,07	3,25±0,03

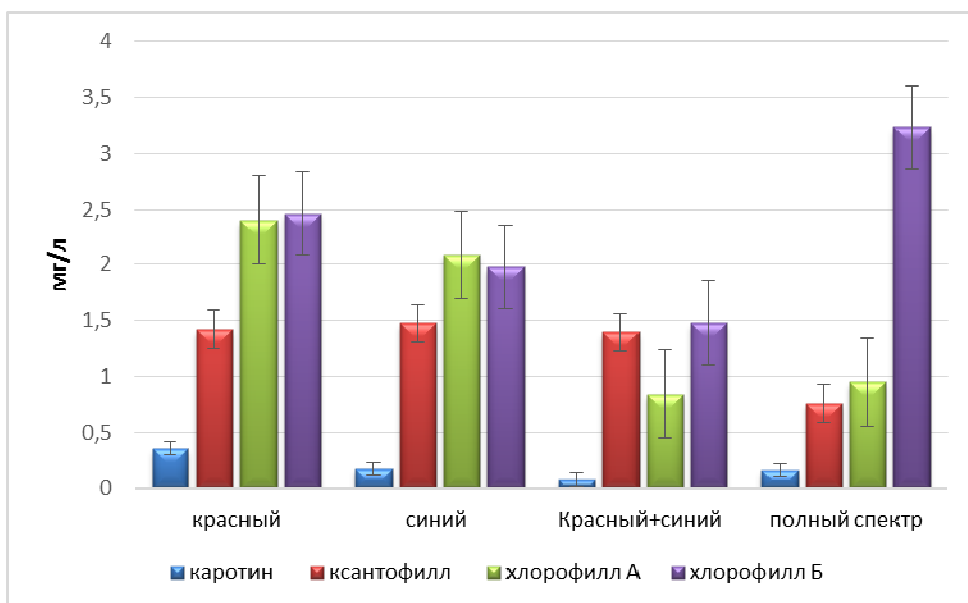


Рис. 5. Влияние различных вариантов освещения на накопление пигментов хлореллы.

Хлорофилл *a* – основной пигмент фотосинтеза, участвует в трансформации световой энергии в химическую. Остальные пигменты считаются вспомогательными, так как они лишь передают хлорофиллу поглощенную ими энергию и защищают клетку от избытка облучения и свободных радикалов [19]. Фенотипическую адаптацию фотосинтетического аппарата водорослей к изменению спектрального состава света называют хроматической адаптацией. Хроматическая адаптация предполагает изменение в соотношении вспомогательных пигментов (каротинов и ксантофилов), которое способствует более эффективному поглощению доступных квантов света.

В клетках хлореллы содержание ксантофилов практически не меняется при различных видах освещения (красный, синий свет: 1,42 и 1,47 мг/г, соответственно) и незначительно снижается при "полном спектре" (0,76 мг/г). Наибольшее количество каротинов в клетках хлореллы синтезируется при освещении красным светом (0,35 мг/г) и меньше – при синем (0,176 мг/г). Каротины имеют максимумы поглощения в области сине-фиолетовых длин волн (450 нм), т.е. происходят компенсирующие изменения в фототосистемах хлореллы. Такой тип адаптации можно считать инверсивной [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что спектральный состав света влияет на рост биомассы, белковый и пигментный состав микроводоросли *Chlorella vulgaris*.

2. Наибольший прирост биомассы и суммарное накопление пигментов наблюдался при освещении длинноволновым красным светом, продукция белка увеличивалась при выращивании хлореллы в условиях освещения синими светодиодами.
3. Вероятно, преобразование световой энергии в микроводорослях является интегральным процессом, включающим изменения в системах различных биохимических механизмов регуляции биосинтеза и адаптации.

Список литературы

1. Barkia I. Microalgae for High-Value Products Towards Human Health and Nutrition / I. Barkia, N. Saari, S. R. Manning // *Mar. Drugs*. – 2019. – Vol.17. – P. 1–29.
2. Danesi E. D. G. Effect of reducing the light intensity on the growth and production of chlorophyll by *Spirulina platensis* / E. D. G. Danesi, C. O. Rangel-Yagui, J. C. M. Carvalho, S. Sato // *Biomass Bioenergy*. – 2004. – Vol. 26, No. 4. – P. 329–335.
3. Полубояринов П. А. Оценка химического состава биомассы хлореллы, используемой в процессах естественной биологической очистки сточных вод / П. А. Полубояринов, С. Ю. Андреев, И. А. Гарькина, Г. П. Давыдов // *Региональная архитектура и строительство*. – 2014. – вып. 3. – С. 75–81.
4. Slade R. Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects / R. Slade, A. Bauen // *Biomass Bioenergy*. – 2013. – Vol. 53. – P. 29–38.
5. Delavari A. H. An integrated wavelength-shifting strategy for enhancement of microalgal growth rate in PMMA-and polycarbonate-based photobioreactors / A. H. Delavari, B. Nasernejad, R. Ranjbar, S. Rastegar // *Eur. J. Phycol.* – 2014. – Vol.49, No. 3. – P. 324–331.
6. Wang C. Y. Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis* / C. Y. Wang, C. C. Fu // *Biochem. Eng. J.* – 2007. – Vol. 37, No.1. – P. 21–25.
7. Zhao Y. Effects of various LED light wavelengths and intensities on microalgae-based simultaneous biogas upgrading and digestate nutrient reduction process / Y. Zhao, H. Z. Cheng, Y. Y. Zhang // *Biores. Technol.* – 2013. – Vol. 136. – P.461–468.
8. Khoobkar Z. Performance Assessment of a Novel Pyramid Photobioreactor for Cultivation of Microalgae Using External and Internal Light Sources / Z. Khoobkar, F. P. Shariati, A. A. Safekordi, H. D. Amrei // *Food Technol. Biotechnol.* – 2019. – Vol. 57, No. 1. – P. 68–76.
9. Чурилова Т. Я. Глава 11. Пигменты микроводорослей / Т. Я. Чурилова, З. З. Финенко, А. И. Акимов // *Микроводоросли Черного моря: проблемы сохранения биоразнообразия и биотехнологического использования НАН Украины, Институт биологии южных морей*. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. – С. 301–319.
10. Сосновский Е. С. Биореактор для выращивания хлореллы и исследования влияния облучения монохроматическим светом / Е. С. Сосновский, О. Е. Князева, А. В. Кузнецова, П. А. Полубояринов // *Образование и наука в современном мире. Инновации*. – 2022. – Т.2, вып. 39. – С. 60–66.
11. ТУ 9291-003-12001826-05. Техническая инструкция на производство суспензии хлореллы-альголизанта водоемов. Пенза. НУНИИ «Альгобиотехнологии». – 2005.
12. Osborne T. B. The chemistry of the protein-bodies of the wheat kernel. Part I. The protein soluble in alcohol and its glutaminic acid content / T. B. Osborne // *American Journal of Physiology*. – 1905. – Vol. 13. – P. 35–44.
13. Минеев В. Г. Практикум по агрохимии. Москва / В. Г. Минеев, В. Г. Сычев, О. А. Амелянчик [и др.] – изд-во МГУ, 2001. – 689 с.
14. Bradford A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding / Bradford, M. Marion // *Analytical biochemistry*. – 1976. – Vol. 72. – P. 248–254.
15. Гавриленко В. Ф. Большой практикум по физиологии растений. / В. Ф. Гавриленко, М. Е. Ладыгина, Л. М. Хандобина. – М.: Высшая школа, 1975. – 392 с.
16. Patent US № 6921182. 2005. // Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office / Jr Anderson, W. Grant, and L. S. Capen.

17. Сергеева К. А. Физиологические и биохимические основы зимостойкости древесных растений. / К. А. Сергеева. – М. : Наука, 1971. – 176 с.
18. Light-Harvesting Antennas in Photosynthesis. Eds. B. R.Green, W. W. Parson. Kluwer, Dordrecht, 2003.
19. Jeffrey S. Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods / S. Jeffrey, R. Mantoura, S. Wright // ParisUNESCO Publishing Google Scholar. – 1997.
20. Tandeau de Marsac N. Adaptation of Cyanobacteria to environmental stimuli: new steps towards molecular mechanisms / N. Tandeau de Marsac, J. Houmard // FEMS Microbiol. Rev. – 1993. – Vol. 10. – P. 119–189.

INVESTIGATION OF THE LED-LIGHT EFFECT ON THE BIOMASS ACCUMULATION, PROTEIN AND PIGMENT CONTENTS OF CHLORELLA

Knyazeva O. E.¹, Sosnovsky E. S.², Moiseeva I. Ya.², Kuznetsova A. V.², Poluboyarinov P. A.², Semenova E. F.³

¹*Penza State University of Architecture and Construction, Penza, Russia*

²*Penza State University, Penza, Russia*

³*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Crimea, Russian Federation*

E-mail: sef1957@mail.ru

Microalgae are fast growing organisms with outstanding potential as for new bioactive substances as a food supplement and a source for pharmaceutical industries. As photosynthetic organisms, chlorella metabolic properties highly depend on the external environment and light characteristics. LEDs are the most promising light sources with narrow bands of wavelengths, small size and low power consumption. The aim of the study was to investigate the influences of light wavelength on chlorella microalgae growth, protein and pigment contents. It seemed interesting to study the adaptive role of photosynthetic pigments - chlorophylls *a* and *b*, carotenoids and xanthophylls.

Materials and methods. Chlorella microalgae (ИФР №С-11) were cultivated in photobioreactor in 3–4-cycles (10h illumination and 14 h dark phase). Light sources were red LEDs (660 nm), blue (440 nm), red+ blue (1:1) and full spectrum violet phyto-LEDs. Chlorella growth, protein and pigments contents were tested as a function of light regimes.

Results. Red light was determined as the optimal for Chlorella microalgae growth (5–7 fold) and chlorophyll *a* production. Chlorophyll *a* is very important in the energy phase of photosynthesis. Cultivation of chlorella with blue LED showed the greatest accumulation of cellular protein, due to an increase in the glutelins fraction. The spectral composition of light affects the content of both chlorophylls and carotenoids. The chlorophyll *a* content is slightly increased in red light compared to blue and almost doubled decreased in illumination with red + blue (1:1) LEDs and violet "full spectrum" LEDs. Overall the utilization and transformation of light by chlorella are complex processes with combination of effects. The results from this study are fundamental for realization of effective biotechnological production of chlorella biomass.

Keywords: chlorella, photobioreactor, LED, carotenes, xanthophylls, chlorophyll, pigments, proteins.

References

1. Barkia I., Saari N., Manning S. R. Microalgae for High-Value Products Towards Human Health and Nutrition, *Mar. Drugs*, **17**, 1 (2019). pii: E304. doi: 10.3390/md17050304.
2. Danesi E. D. G., Rangel-Yagui C. O., Carvalho J. C. M., Sato S. Effect of reducing the light intensity on the growth and production of chlorophyll by *Spirulina platensis*, *Biomass Bioenergy*, **26** (4), 329 (2004) doi:10.1016/S0961-9534(03)00127-2
3. Poluboyarinov P. A., Andreev S. Yu., Gar'kina I. A., Davydov G. P. Ocenka himicheskogo sostava biomassy hlorelly, ispol'zuemoj v processah estestvennoj biologicheskoy ochistki stochnyh vod, *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*, **3**, 75 (2014).
4. Slade R., Bauen A. Micro-algae cultivation for biofuels: Cost, energy balance, environmental impacts and future prospects, *Biomass Bioenergy*, **53**, 29 (2013). 10.1016/j.biombioe.2012.12.019
5. Delavari A. H., Nasernejad B., Ranjbar R., Rastegar S. An integrated wavelength-shifting strategy for enhancement of microalgal growth rate in PMMA-and polycarbonate-based photobioreactors, *Eur. J. Phycol.*, **49** (3), 324 (2014). doi:10.1080/09670262.2014.919030
6. Wang C. Y., Fu C. C. Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis*, *Biochem. Eng. J.*, **37** (1), 21 (2007).
7. Zhao Y., Cheng H. Z., Zhang Y. Y. Effects of various LED light wavelengths and intensities on microalgae-based simultaneous biogas upgrading and digestate nutrient reduction process, *Biores. Technol.*, **136**, 461 (2013).
8. Khoobkar Z., Shariati F. P., Safekordi A. A., Amrei H. D. Performance Assessment of a Novel Pyramid Photobioreactor for Cultivation of Microalgae Using External and Internal Light Sources, *Food Technol. Biotechnol.* **57** (1), 68 (2019). doi: 10.17113/ftb.57.01.19.5702.
9. Churilova T. Ya. Glava 11. Pigmenty mikrovodoroslej, *Mikrovodorosli Chernogo morya: problemy sohraneniya bioraznoobraziya i biotekhnologicheskogo ispol'zovaniya* (EKOSI-Gidrofizika, Sevastopol, 2008), p. 301-319.
10. Sosnovskij E. S., Knyazeva O. E., Kuznecova A. V., Poluboyarinov P. A. Bioreaktor dlya vyrashchivaniya hlorelly i issledovaniya vliyaniya oblucheniya monohromaticheskim svetom, *Obrazovanie i nauka v sovremennom mire. Innovacii*, **2** (39), 60 (2022).
11. TU 9291-003-12001826-05. *Tekhnicheskaya instrukciya na proizvodstvo suspenzii hlorelly-al'golizanta vodoemov*. (NUNII «Al'gobiotekhnologii», Penza, 2005).
12. Osborne T. B. The chemistry of the protein-bodies of the wheat kernel. Part I. The protein soluble in alcohol and its glutaminic acid content, *American Journal of Physiology*, **13**, 35 (1905).
13. Mineev V. G., Sychev V. G., Amel'yanchik O. A., Bolysheva T. N., Gomonova N. F., Durygina E. P., Egorov B. C., Egorova E. V., Edemskaya N. L., Karpova E. A., Prizhukova V. G. *Praktikum po agrohimii*. 689 p. (MGU, Moskva, 2001).
14. Bradford, Marion M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding, *Analytical biochemistry*, **72**, 248 (1976) doi:10.1006/abio.1976.9999. PMID 942051.
15. Gavrilenko V. F., Ladygina M. E., Handobina L. M. *Bol'shoj praktikum po fiziologii rastenij*, 392 p. (Vysshaya shkola, Moskva, 1975).
16. Anderson Jr, W. Grant, and L. S. Capen. Patent US № 6921182 (Patent and Trademark Office, Washington, 2005).
17. Sergeeva K. A. *Fiziologicheskie i biohimicheskie osnovy zimostojkosti drevesnyh rastenij*, 176 p. (Nauka, Moskva, 1971).
18. *Light-Harvesting Antennas in Photosynthesis*. Eds. B. R.Green, W. W. Parson (Kluwer, Dordrecht, 2003).
19. Jeffrey S., Mantoura R., Wright S. *Phytoplankton Pigments in Oceanography: Guidelines to Modern Methods* (UNESCO Publishing Google Scholar, Paris, 1997).
20. Tandeau de Marsac N., Houmard J. Adaptation of Cyanobacteria to environmental stimuli: new steps towards molecular mechanisms, *FEMS Microbiol. Rev.*, **10**, 119 (1993).