

ГЕНЕТИКА, БИОТЕХНОЛОГИЯ

Научная статья
УДК 582.26/.27
doi: 10.26897/2949-4710-2023-1-15-22



Создание фотобиореактора для эффективного роста хлореллы и изучение влияния спектрального состава света на ее биомассу

*Юлия Александровна Дудина, Елена Анатольевна Калашникова,
Рима Нориковна Киракосян*

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; г. Москва, Россия

Автор, ответственный за переписку: Юлия Александровна Дудина; mabetta@mail.ru, dudina.biotech@gmail.com

Аннотация. Хлорелла – зеленая эукариотическая микроводоросль (*Chlorella vulgaris*). Микроскопическая клетка сферическая, диаметром 2–10 мкм. Данная микроводоросль – одна из наиболее важных и перспективных для производства биомассы. Хлореллу культивируют в прудах или биореакторах с заданными параметрами, создающими благоприятные условия для роста ее биомассы. Каждый набор условий создает предпосылки для изменения темпа роста и выхода отдельных продуктов. Объектом исследования служили два штамма хлореллы: 1 – с тонкой клеточной стенкой (*Chlorella vulgaris* VKPM AI-24); 2 – с толстой клеточной стенкой (*Chlorella vulgaris* Beijer). Культуру хлореллы культивировали на модифицированной питательной среде Тамия при температуре 24°C и круглосуточном освещении. Хлореллу выращивали в течение 5 сут. в колбах 1000 мл в светонепроницаемых гроубоксах, в которых были установлены разные режимы освещения. Контрольный вариант выращивали в световой комнате с освещением белыми люминесцентными лампами с интенсивностью 150 мкмоль/м²с, также культуру выращивали в темноте. Проведенные лабораторные эксперименты, направленные на изучение влияния спектрального состава света на рост двух штаммов культуры хлореллы, позволили выявить некоторые закономерности: 1) наибольший прирост биомассы наблюдается при использовании освещения белыми люминесцентными лампами (T = 2700K); 2) в случае использования ДК > К или ДК = К наблюдали ингибирующее их действие на рост изучаемых штаммов хлореллы. Кроме того, при определении оптической плотности культур были получены схожие результаты, которые свидетельствуют об одинаковом восприятии изучаемых штаммов хлореллы на действие различного спектрального состава света. Анализируя спектр поглощения, следует отметить, что он имеет непрерывный характер. Экспериментально установлено, что первый максимум расположен в красной области (от 660 до 690 нм), второй – в синей области (430 до 450 нм). Минимальное поглощение наблюдается в зеленой области света (500 до 610 нм).

Ключевые слова: хлорелла, биологически активные соединения, биотехнологические аспекты культивирования микроводорослей

Для цитирования: Дудина Ю.А., Калашникова Е.А., Киракосян Р.Н. Создание фотобиореактора для эффективного роста хлореллы и изучение влияния спектрального состава света на ее биомассу // Тимирязевской сельскохозяйственной академии. Биологические науки. 2023. № 1. С. 15–22. <http://dx.doi.org/10.26897/2949-4710-2023-1-15-22>

© Дудина Ю.А., Калашникова Е.А., Киракосян Р.Н.

GENETICS, BIOTECHNOLOGY

Original article
doi: 10.26897/2949-4710-2023-1-15-22

Creation of a Photobioreactor for the Effective Growth of *Chlorella* and Study of the Effect of the Spectral Composition of Light on Its Biomass

Yulia A. Dudina, Elena A. Kalashnikova, Rima N. Kirakosyan

Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia

Corresponding author: Yulia A. Dudina, mabetta@mail.ru, dudina.biotech@gmail.com

Abstract. *Chlorella* is a green eukaryotic microalga (*Chlorella vulgaris*). The microscopic cell is spherical, 2–10 µm in diameter. This microalga is one of the most important and promising for biomass production. *Chlorella* is cultivated in ponds or bioreactors with specified parameters that create favorable conditions for the growth of *chlorella* biomass. Each set of conditions creates the opportunities for changing the growth rate and output of individual products. Two strains of *chlorella* were the object of the study: 1 – *chlorella* with a thin cell wall (*Chlorella vulgaris* VKPM AI-24); 2 – *chlorella* with a thick cell wall (*Chlorella vulgaris* Beijer). The culture of *chlorella* was cultivated on modified Tamiya nutrient medium,

at 24°C and 24-hour illumination. It was cultivated for 5 days in 1000 ml flasks, in opaque grow boxes with different lighting regimes. The control variant was grown in a light room with white fluorescent lamps with an intensity of 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$, and the culture was also grown in the dark. Laboratory experiments studying the effect of spectral composition of light on growth of two strains of chlorella culture allowed identifying some regularities: 1 – the largest increase in biomass is observed when using white fluorescent lamps ($T = 2700\text{K}$); 2 – in the case of using $\text{FR} > \text{R}$ or $\text{FR} = \text{R}$, their inhibitory effect on the growth of the studied strains of chlorella was observed. In addition, similar results were obtained when determining the optical density of the cultures, suggesting that the chlorella strains studied are similarly responsive to the action of different spectral compositions of light. Analyzing the absorption spectrum, it should be noted that it has a continuous character. It has been experimentally established that the first maximum is located in the red region (660 to 690 nm) and the second in the blue region (430 to 450 nm). The minimum absorption is observed in the green light region (500 to 610 nm).

Keywords: chlorella, biologically active compounds, biotechnological aspects of microalgae cultivation

For citation: Dudina Yu.A., Kalashnikova E.A., Kirakosyan R.N. Creation of a Photobioreactor for the Effective Growth of Chlorella and Study of the Effect of the Spectral Composition of Light on Its Biomass // Timiryazev Biological Journal. 2023;1:15–22. (In Rus.). <http://dx.doi.org/10.26897/2949-4710-2023-1-15-22>

Введение

Хлорелла – зеленая эукариотическая микроводоросль (*Chlorella vulgaris*). Микроскопическая клетка сферическая, диаметром 2–10 мкм. Данная микроводоросль – одна из наиболее важных и перспективных для производства биомассы [4].

Хлорелла содержит пул биологически активных веществ: около 50% белка (включающего в себя незаменимые аминокислоты); комплекс незаменимых ненасыщенных жирных кислот (включая Омега-3); витамины (А, В1, В2, В3, В5, В6, Е), макро- и микроэлементы. Это создает предпосылки для ее коммерческого производства в целях использования в медицине, косметологии и ветеринарии. Кроме того, комплекс веществ, входящий в состав хлореллы, – в частности, антиоксиданты, провитамины, витамины и другие вещества, являются необходимым компонентом роста хлореллы (chlorella growth factor).

Пищевое производство активно использует хлореллу в виде суспензий, порошков и таблеток как в качестве добавок, так и в виде самостоятельных продуктов.

Учеными установлено, что хлорелла оказывает антиоксидантное, противовоспалительное, противомикробное и даже ранозаживляющее действие благодаря наличию данного пула биологически активных соединений [1].

Существуют исследования, касающиеся радиозащитных свойств микроводорослей при радиоактивном облучении модельных организмов. Показано, что включение в рационы кормления крыс водоросли хлореллы способствует повышению биохимических показателей сыворотки крови радиоактивно облученных животных [7].

В сельском хозяйстве хлореллу используют в технологиях кормления сельскохозяйственных животных. Даже при коммерчески приемлемом объеме добавок на основе хлореллы для кормления птицы, свиней и других видов сельскохозяйственных животных биомасса хлореллы может эффективно работать как кормовая добавка или замена дорогостоящих составных частей кормов. Важной предпосылкой для широкомасштабного использования биомассы водорослей в качестве кормовой добавки является продолжающееся удешевление технологических процессов.

В сфере экобиотехнологий хлорелла применяют для биоремедиации окружающей среды (водоемов).

Для производства биотоплива из хлореллы необходимо добиться определенного состава, так как содержание и качественный состав липидов являются важнейшими параметрами качества при создании данного вида топлива. В исследовании Mallick et al. (2012) ученые добились повышения липидного пула на 9% (до 55% сухой массы) [3].

Закрытые системы жизнеобеспечения, предназначенные для поддержания жизнедеятельности космонавтов, в том числе при полетах на дальние расстояния, разработаны на основе биореакторов, производящих микроводоросли, которые фильтруют отходы, затем используемые повторно. Эксперименты по созданию таких систем не раз проводились отечественными и зарубежными учеными с разной степенью успеха.

Культивирование хлореллы обычно происходит в специальных установках, биореакторах или искусственных водоемах. Каждый набор условий создает предпосылки для изменения темпа роста и выхода отдельных продуктов (например, липидов, как было указано выше).

Существуют данные о влиянии разных спектров в течение дня на рост культуры хлореллы [2, 8]. Например, активность роста хлореллы коррелировала с использованием разного спектрального состава света в определенные промежутки дня: синий спектр показывал наилучшее влияние утром, белый – днем, красный – вечером (рис. 1). Хлорелла, как было установлено, обладает фазами роста, и в определенное время суток ей необходимо определенное излучение. Использование этих данных может сократить затраты при промышленном производстве микроводорослей и повысить эффективность использования электроэнергии.

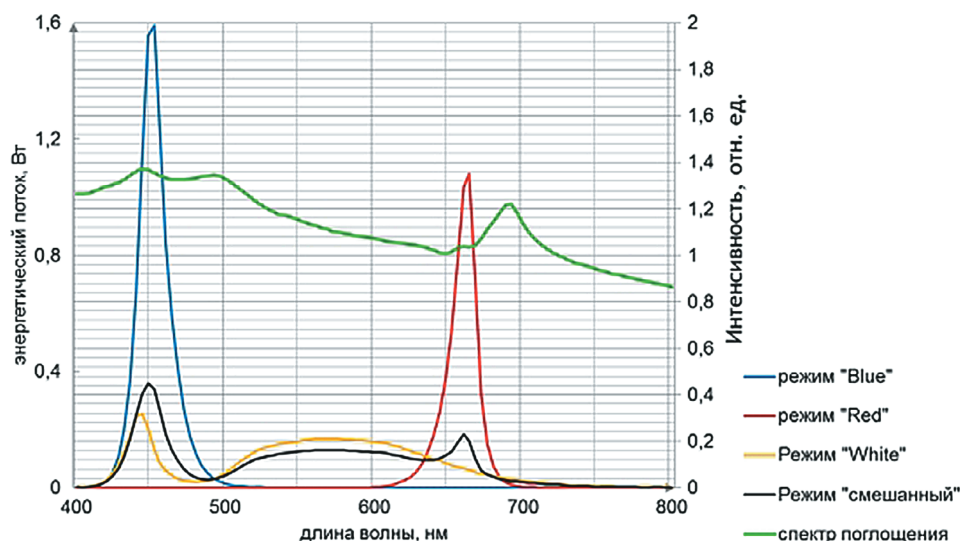


Рис. 1. Спектры облучения и поглощения хлореллы [8]

Таким образом, анализ современных научных данных литературы позволил нам заключить, что улучшение качества такой широко известной микроводоросли, как хлорелла, и наработка ее биомассы, включая исследования по контролю выхода отдельных компонентов, являются важными задачами биотехнологии. Хлорелла находит широкое применение в различных областях и сферах экономической деятельности человека: от сельского хозяйства до экологии и производства биотоплива. Поэтому необходимо постоянно совершенствовать технологии выращивания культуры хлореллы в закрытых системах и устанавливать оптимальные режимы ее выращивания.

Цель исследований: изучение влияния спектрального состава света на рост биомассы хлореллы и создание фотобиореактора для эффективного роста культуры.

Методика исследований

Объектом исследования служили два штамма хлореллы: 1 – с тонкой клеточной стенкой (*Chlorella vulgaris* ВКПМ А1-24); 2 – с толстой клеточной стенкой (*Chlorella Vulgaris* Beijer), предоставленные соответственно ООО «Альготек» и кафедрой гидробиологии МГУ им. М.В. Ломоносова [6].

Прототипы фотобиореактора для эффективного культивирования микроводоросли хлореллы были разработаны в рамках проекта «435nm» совместно с инженерами сообщества «Твой сектор космоса». Для формулировки и отработки гипотез были сконструированы экспериментальные стенды, а также прототипы самого фотобиореактора. За время исследований создано 4 прототипа фотобиореактора, которые были обозначены как 200, 401, 402 и 402.3.

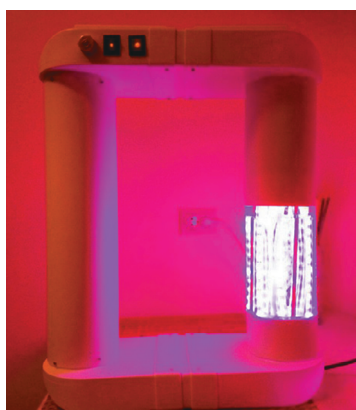
В каждом биореакторе были следующие блоки: корпус; рама; система циркуляции среды; система подачи среды; система регулирования кислотности среды; система измерения оптической плотности среды; система обеспечения температурного режима среды; система подачи газа; система управления газовым составом на входе; система измерения газового состава на выходе; система очистки полости фотобиореактора; система освещения; система управления; блок питания.

Фотобиореакторы по вариантам отличались по материалам, из которых был изготовлен корпус: оргстекло; фторопласт; алюминиевые сплавы; нержавеющая сталь (рис. 2).

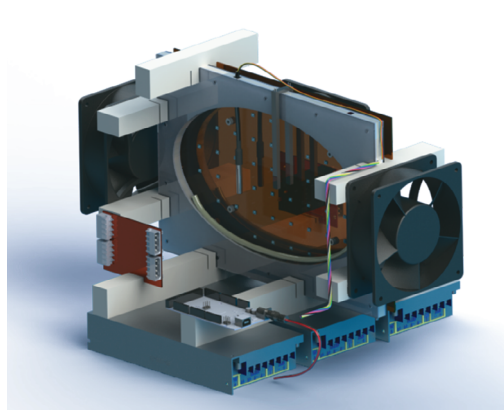
Культуру хлореллы культивировали на модифицированной питательной среде Тамия при температуре $24 \pm 1^\circ\text{C}$ и круглосуточном освещении. Динамику роста хлореллы определяли с помощью датчиков оптической плотности, встроенных в фотобиореакторы.

Помимо создания прототипов фотобиореактора, изучено влияние различных источников света на биометрические показатели хлореллы в разных условиях выращивания. Хлореллу выращивали в колбах 1000 мл в светонепроницаемых грубобоксах: Urban Grower $60 \times 60 \times 200$ см (Gorshkoff, Россия), в которых были установлены разные режимы освещения – соотношение красного (К) и дальнего красного света (ДК). Варианты освещения: 1 – $K/DK = 1$, PPFD = $142 (\pm 10)$ мкмоль/м²с ($K = DK$); 2 – $K/DK = 2$, PPFD = $142 (\pm 10)$ мкмоль/м²с ($K > DK$); 3 – $K/DK = 1/2$, PPFD = $142 (\pm 10)$ мкмоль/м²с ($DK > K$). Контрольный вариант выращивали в световой комнате с освещением белыми люминесцентными лампами (марка «OSRAM AG», производство Германия) с интенсивностью 150 мкмоль/м²с, также выращивали культуру в темноте. Во всех вариантах культуру выращивали в течение 5 сут.

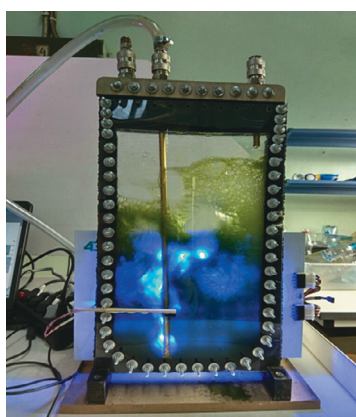
Оптическую плотность культуры хлореллы определяли в динамике на 1, 3 и 5 сутки на спектрофотометре Cary-50, Varian, США [9].



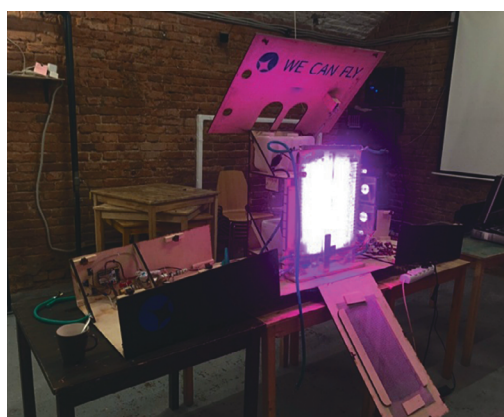
фотобиореактор «200»



фотобиореактор «401»



фотобиореактор «402»



фотобиореактор «403»

Рис. 2. Варианты фотобиореакторов

Для характеристики роста хлореллы в разных условиях освещения применяли два показателя: индекс роста (I) и удельную скорость роста (μ), которые рассчитывали по формулам:

$$I = \frac{X_{\max} - X_0}{X_0}, \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\ln X_2 - \ln X_1}{t_2 - t_1}, \quad (2)$$

где $X_{\max}$ и X_0 – максимальное и начальное значения оптической плотности, ед.; X_2 и X_1 – значение оптической плотности (мм) в момент времени t_2 и t_1 , сут., соответственно.

Исследования проводили в 3 биологических и 5 аналитических повторностях. Средние значения всех данных были рассчитаны с использованием Microsoft Excel 2013 (корпорация Microsoft, США). Дисперсионный анализ (ANOVA) проводился с использованием Statistica версии 10.0, а средние значения сравнивались с использованием критерия наименьшей значимой разницы Фишера (LSD) при уровне значимости $p \leq 0,05$.

Результаты и их обсуждение

На основе проведенных исследований было установлено, что исследуемые фотобиореакторы не имеют окончательного технического решения для непрерывного выращивания культуры хлореллы. Все исследуемые фотобиореакторы имели недостатки: 1 – затрудненный доступ к подсистемам, приводящий к полному демонтажу системы и отключением-расстыковкой разъемов-шлангов; 2 – наличие застойных зон по причине неправильного расположения трубок подвода воздуха и системы циркуляции; 3 – светодиоды зарастали хлореллой, так как находились внутри фитобиореактора, что приводило к снижению их эффективности. Выявленные недостатки оказали отрицательное влияние на рост хлореллы. Как правило, уже на первые сутки с начала культивирования культура выпадала в осадок и прекращала свой рост. Анализ выявленных недостатков позволил нам сконструировать новый фотобиореактор «402.1», в условиях которого наблюдали активный рост хлореллы при длительном культивировании (рис. 3).

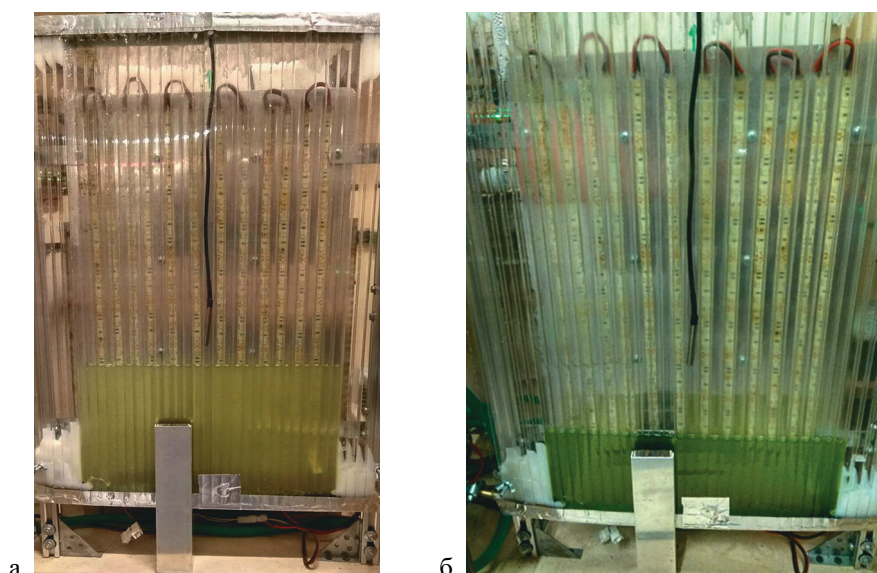


Рис. 3. Внешний вид фитобиореактора «402.1» с культурой хлореллы:
а – начало культивирования; б – конец культивирования

Проведенные лабораторные эксперименты, направленные на изучение влияния спектрального состава света на рост двух штаммов культуры хлореллы, позволили выявить некоторые закономерности: 1 – наибольший прирост биомассы наблюдается при использовании освещения белыми люминесцентными лампами ($T = 2700\text{K}$); 2 – в случае использования $\text{ДК} > \text{К}$ или $\text{ДК} = \text{К}$ наблюдали ингибирующее их действие на рост изучаемых штаммов хлореллы. Кроме того, при определении оптической плотности культур были получены схожие результаты, которые свидетельствуют об одинаковом восприятии изучаемых штаммов хлореллы на действие различного спектрального состава света.

Экспериментально установлено, что при культивировании хлореллы с толстой стенкой (*Chlorella vulgaris* Beijer) наибольший прирост наблюдался при ее выращивании в условиях освещения белыми люминесцентными лампами, наименьший – при использовании $\text{К} = \text{ДК}$ или $\text{ДК} > \text{К}$ (табл. 1).

На рисунке 4 представлена динамика роста хлореллы с толстой стенкой в зависимости от оптической плотности и длительности культивирования.

Анализируя спектр поглощения, следует отметить, что он имеет непрерывный характер. Однако при разной длине волны наблюдается появление двух пиков, в которых наблюдается максимальное поглощение квантов света. Экспериментально установлено, что первый максимум расположен в красной области (от 660 до 690 нм), второй – в синей области (430 до 450 нм). Минимальное поглощение наблюдается в зеленой области света (500 до 610 нм).

Полученные данные согласуются с результатами других авторов, свидетельствующих о том, что именно в этих областях света эффективность фотосинтеза является наибольшей (рис. 5).

Таблица 1

Результаты измерений оптической плотности, индекса роста (I) и удельной скорости роста (μ) суспензии хлореллы с толстой клеточной стенкой при использовании различных источников света

Тип освещения	При длине волны 440 нм					При длине волны 690 нм				
	D_0	D	$D-D_0$	I	μ	D_0	D	$D-D_0$	I	μ
СД, $T = 2700\text{K}$ контроль	0,515	2,811	2,296	4,45	0,42	0,458	2,492	2,029	4,43	0,42
$\text{К} = \text{ДК}$	0,527	1,634	1,107	2,10	0,28	0,472	1,510	1,039	2,20	0,29
$\text{К} > \text{ДК}$	0,523	1,898	1,375	2,62	0,32	0,464	1,666	1,202	2,59	0,32
$\text{ДК} > \text{К}$	0,530	1,654	1,124	2,12	0,28	0,474	1,467	0,994	2,10	0,28
темнота	0,526	0,463	–0,063	–0,12	–0,03	0,472	0,413	–0,059	–0,13	–0,03

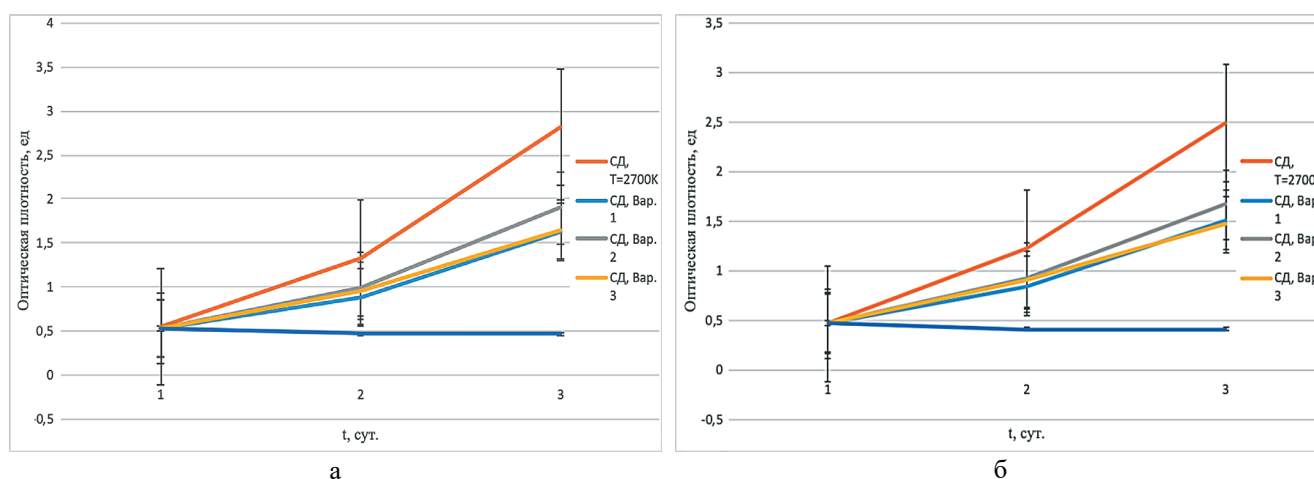


Рис. 4. Зависимость оптической плотности суспензии *Chlorella Vulgaris* Beijer от длительности культивирования: а – при $\lambda = 440$ нм; б – при 690 нм

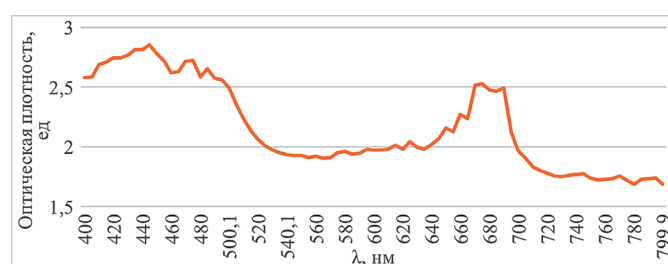


Рис. 5. Зависимость оптической плотности культивируемой при освещении СД, T = 2700К суспензии *Chlorella vulgaris* Beijer на 5-е сутки в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм

Исследования, проведенные со штаммом хлореллы с тонкой стенкой (*Chlorella vulgaris* ВКПМ А1-24), показали схожие результаты со штаммом хлореллы с толстой стенкой. Наибольший прирост наблюдался при освещении белыми люминесцентными лампами, а минимальный – при использовании ДК > К (табл. 2).

На рисунке 6 представлена динамика роста тонкостенной хлореллы в зависимости от оптической плотности и длительности культивирования.

Спектр поглощения тонкостенной хлореллы аналогичен описанному выше и имеет два максимума: первый расположен в синей области (от 445 до 500 нм), второй – в красной области (от 670 до 690 нм) (рис. 7).

Таблица 2

Результаты измерений оптической плотности, индекса роста (I) и удельной скорости роста (μ) суспензии хлореллы с тонкой клеточной стенкой при использовании различных источников света

Тип освещения	При длине волны 440 нм					При длине волны 690 нм				
	D ₀	D	D-D ₀	I	μ	D ₀	D	D-D ₀	I	μ
СД, T = 2700К контроль	0,317	1,742	1,425	4,50	0,43	0,269	1,605	1,336	4,97	0,45
К = ДК	0,384	0,895	0,511	1,33	0,21	0,333	0,881	0,549	1,65	0,24
К > ДК	0,442	1,195	0,753	1,70	0,25	0,391	1,068	0,678	1,73	0,25
ДК > К	0,377	0,725	0,349	0,93	0,16	0,323	0,709	0,387	1,20	0,20
темнота	0,368	0,596	0,229	0,62	0,12	0,334	0,492	0,158	0,47	0,10

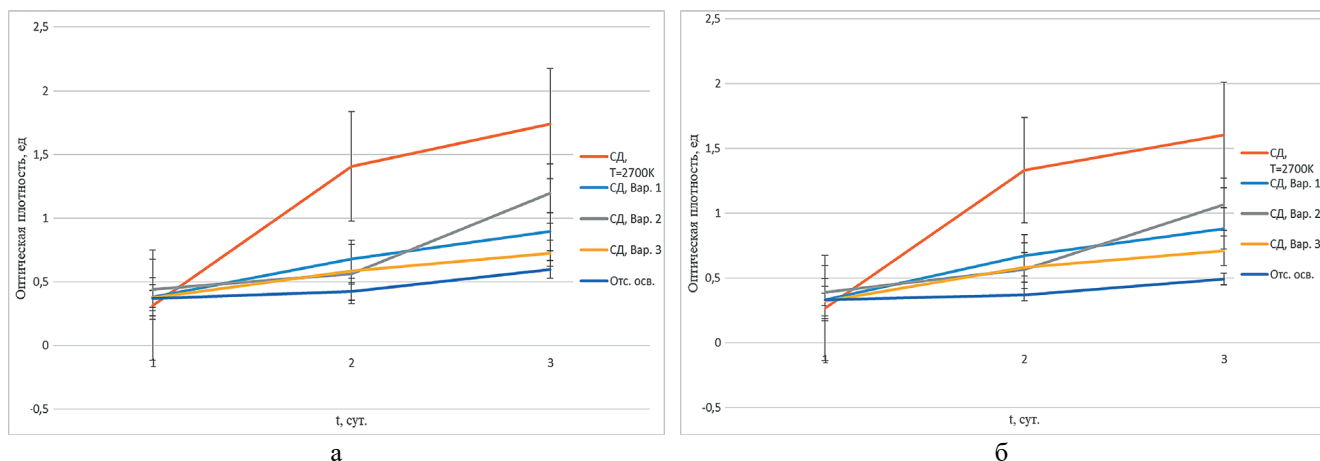


Рис. 6. Зависимость оптической плотности суспензии *Chlorella Vulgaris* ВКПМ АI-24 от длительности культивирования: а – при $\lambda = 440$ нм; б – при 690 нм

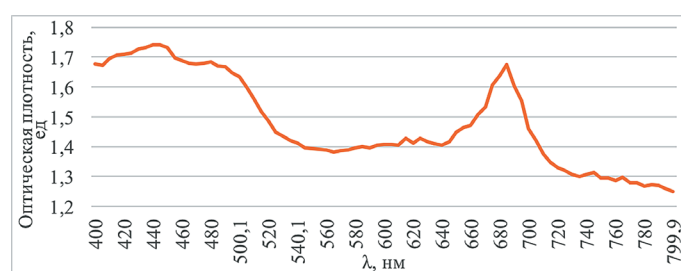


Рис. 7. Зависимость оптической плотности культивируемой при освещении СД, T = 2700K суспензии *Chlorella vulgaris* ВКПМ АI-24 на 5-е сутки в диапазоне длин волн от 400 до 800 нм

Выводы

Хлорелла является актуальным объектом изучения в связи с ее широким использованием в различных областях народного хозяйства – таких, как сельское хозяйство, экология, производство биотоплива и другие, а также в связи с перспективами ее использования в космических биотехнологиях.

Созданные нами фотобиореакторы для роста хлореллы имели недостатки – такие, как затрудненный доступ к подсистемам, наличие застойных зон ввиду неправильного расположения трубок подвода воздуха и системы циркуляции, а также неправильное расположение светодиодов, которые зарастали хлореллой. Анализ этих недостатков позволил нам сконструировать новый фотобиореактор «402.1», в условиях которого наблюдался активный рост хлореллы при длительном культивировании.

Результаты измерений оптической плотности штамма хлореллы с толстой и тонкой клеточной стенкой позволили отметить, что наибольший прирост биомассы микроводоросли хлореллы наблюдается при применении белого люминесцентного освещения, а минимальный – при использовании К = ДК или ДК > К. Это противоречит большинству изученных источников, доказывающих положительное влияние красного спектра (в том числе дальнего красного) на рост биомассы хлореллы. В то же время наши данные подтверждают результаты, полученные другими авторами и свидетельствующие о том, что белый свет является оптимальным освещением для увеличения биомассы клеток.

Список источников

1. Andrade C.J., De Andrade L.M. An overview on the application of genus *Chlorella* in biotechnological processes // *Symbiosis*. – 2017. doi: 10.15226/2475–4714/2/1/00117.
2. Bialon J. Growth rates and photon efficiency of *Chlorella vulgaris* in relation to photon absorption rates under different LED-types / J. Bialon, T. Rath // *Algal Research*. – 2018. – V. 31. – Pp. 204–215. doi: 10.1016/j.algal.2018.02.007.
3. Mallick N., Mandal S., Singh A.K. et al. Green microalga *Chlorella vulgaris* as a potential feedstock for biodiesel // *Journal of Chemical Technology*

References

1. Andrade C.J., Andrade L.M. An overview on the application of genus *Chlorella* in biotechnological processes. *Symbiosis*. 2017. doi: 10.15226/2475–4714/2/1/00117.
2. Bialon J., Rath T. Growth rates and photon efficiency of *Chlorella vulgaris* in relation to photon absorption rates under different LED-types. *Algal Research*. 2018; 31: 204–215. doi: 10.1016/j.algal.2018.02.007.
3. Mallick N., Mandal S., Singh A.K. et al. Green microalga *Chlorella vulgaris* as a potential feedstock for biodiesel. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2012; 87: 137–145. doi: 10.1002/jctb.2694.

and Biotechnology. – 2012. – V. 87. – Pp. 137–145. doi: 10.1002/jctb.2694.

4. Yamamoto M., Kurihara I., Kawano S. Late type of daughter cell wall synthesis in one of the Chlorellaceae, *Parachlorella kessleri* (Chlorophyta, Trebouxiophyceae) // *Planta*. – 2005. – V. 221 (6) – Pp. 766–775. doi: 10.1007/s00425-005-1486-8.

5. Дудина Ю.А., Калашникова Е.А. Хлорелла как объект биотехнологии: способы культивирования и применение в сельском хозяйстве // Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России: Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза, 2019. – С. 222–225.

6. Лукьянов В.А. Микроводоросль *Chlorella vulgaris* Beijer – высокопродуктивный штамм для сельского хозяйства // Концепт: Научно-методический электронный журнал. – 2015. – Т. 13. – С. 1576–1580.

7. Петряков В.В. Ветеринарная оценка основных биохимических показателей сыворотки крови крыс под воздействием радиации при включении в рационы водоросли хлореллы // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – Оренбург, 2017. – С. 144–145.

8. Трофимчук О.А. Влияние динамического и статического спектров излучения на прирост микроводоросли хлореллы // Высокие технологии в современной науке и технике (ВТСНТ-2017): Сборник научных трудов VI Международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – С. 159–160.

9. Кочубей В.И. Определение концентрации веществ при помощи спектрофотометрии: Руководство к лабораторной работе. – Саратов, 2008. – 14 с.

4. Yamamoto M., Kurihara I., Kawano S. Late type of daughter cell wall synthesis in one of the Chlorellaceae, *Parachlorella kessleri* (Chlorophyta, Trebouxiophyceae). *Planta*. 2005; 221(6): 766–775. doi: 10.1007/s00425-005-1486-8.

5. Dudina Yu.A., Kalashnikova E.A. *Khlorella* kak ob"ekt biotekhnologii: sposoby kul'tivirovaniya i primeneniye v sel'skom khozyaystve [Chlorella as a biotechnology object: cultivation methods and agricultural applications]. Sb. statey po materialam Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Vklad molodykh uchenykh v innovatsionnoye razvitiye APK Rossii". Penza. 2019: 222–225. (In Rus.).

6. Luk'yanov V.A., Stifeev A.I., Gorbunova S.Yu. Mikrovodorosl' *Shlorella vulgaris* Beijer – vysokoproduktivniy shtamm dlya sel'skogo khozyaystva [The microalgae *Chlorella vulgaris* Beijer as a highly productive strain for agriculture]. Nauchno-metodicheskiy elektronnyy zhurnal "Konsept". 2015; 13: 1576–1580. (In Rus.).

7. Petryakov V.V. Veterinarnaya otsenka osnovnykh biokhimicheskikh pokazateley syvorotki krovi krysa pod vozdeystviem radiatsii pri vkluyenii v ratsiony vodorosli khlorelly [Veterinary evaluation of basic biochemical indices of rat serum under the influence of radiation inclusion of chlorella algae in diets]. Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Orenburg. 2017: 144–145. (In Rus.).

8. Trofimchuk O.A. Vliyanie dinamicheskogo i staticheskogo spektrov izlucheniya na prirost mikrovodorosli khlorelly [Effect of dynamic and static radiation spectra on the growth of the microalgae *Chlorella*]. Vysokie tekhnologii v sovremennoy nauke i tekhnike (VTSNT-2017), sb. nauchnykh trudov VI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov. Tomsk: Izd-vo TPU. 2017: 159–160. (In Rus.).

9. Kochubey V.I. Opredeleniye kontsentratsii veshchestv pri pomoshchi spektrofotometrii: ruk. k lab. rabote [Determining the concentration of substances by spectrophotometry: handbook for laboratory work]. Saratov, 2008: 14. (In Rus.).

Сведения об авторах

Юлия Александровна Дудина, аспирант, кафедра биотехнологии, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, Тимирязевская ул., 49; e-mail: mabetta@mail.ru, dudina.biotech@gmail.com; тел.: +7(906)076-58-27; <https://orcid.org/0009-0009-1478-0523>.

Елена Анатольевна Калашникова, профессор, д-р биол. наук, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, Тимирязевская ул., 49; e-mail: ekalashnikova@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2655-1789>.

Рима Нориковна Киракосян, доцент, канд. биол. наук, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Россия, г. Москва, Тимирязевская ул., 49; e-mail: r.kirakosyan@rgau-msha.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5244-4311>.

About the authors

Yulia A. Dudina, post-graduate student, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation); E-mail: mabetta@mail.ru, dudina.biotech@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0009-1478-0523>.

Elena A. Kalashnikova, DSc (Bio), Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation); <https://orcid.org/0000-0002-2655-1789>.

Rima N. Kirakosyan, CSc (Bio), Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy (49 Timiryazevskaya Str., Moscow, 127434, Russian Federation); <https://orcid.org/0000-0002-5244-4311>.