

Пищевая биотехнология

Food biotechnology

DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2019-4-34-39>




Оригинальная статья/Research article

УДК 581.6

Open Access

Available online at vestnik-vsuet.ru

Направленное культивирование *Chlorella sorokiniana* с целью увеличения синтеза каротиноидов




Татьяна А. Кузнецова ¹	kuznetsova.ta1@spbstu.ru	 0000-0003-0162-0896
Мария С. Никитина ¹	emelia211112@gmail.com	 0000-0002-9642-8372
Анна Д. Севастьянова ¹	sevast_ad@spbstu.ru	 0000-0002-8972-5424

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Новороссийская, Институт биомедицинских систем и биотехнологий, 48, г. Санкт-Петербург, 184021, Россия

Аннотация. *Chlorella sorokiniana* – перспективный вид для культивирования как в лабораторном культиваторе, так и в промышленных масштабах. Ее биомасса является источником многих ценных компонентов, включая пластидные пигменты, которые обладают высокой антиоксидантной активностью. Метаболизм *Chlorella sorokiniana* подвержен изменениям под влиянием различных условий культивирования. При дозированном ультрафиолетовом облучении возможно компенсаторное увеличение синтеза каротиноидов, которые предотвращают окислительный стресс. Проведено культивирование *C. sorokiniana* (штамм 211-8k) в различных условиях освещенности: контрольный вариант – освещенность лампой дневного света; вариант 1 – дозированное периодическое ультрафиолетовое воздействие каждые сутки в течение 15 мин (спектральная область светового потока 280-315 нм (УФ-В), интенсивность 1300 Лк) и дальнейшее освещение лампой дневного света; вариант 2 – ультрафиолетовое облучение в течение 30 мин (спектральная область светового потока 280-315 нм (УФ-В), интенсивность 1300 Лк) в фазу стабилизации. Периодическое ультрафиолетовое облучение негативно влияет на рост популяции *C. sorokiniana*, что проявляется только на 9-е сут, выход биомассы существенно снижается. Однократное УФ-облучение в течение 30 минут приводит к незначительному снижению выхода воздушно-сухой биомассы, что при дальнейшем росте популяции может быть скомпенсировано. Периодическое ультрафиолетовое воздействие приводит к увеличению синтеза каротиноидов, выход в пересчете на сухую биомассу превышает контрольный образец в среднем на 30%. Однократное ультрафиолетовое облучение в течение 30 мин в фазу стабилизации приводит к снижению содержания в биомассе как хлорофилла, так и каротиноидов. Микроскопическое исследование популяций микроводоросли показало, что ультрафиолетовое воздействие приводит к появлению клеток с признаками апоптоза: крупные клетки с большими вакуолями, конденсированным ядром, обесцвеченным хлоропластом. Дальнейшим направлением исследования является подбор условий, позволяющих увеличить выход каротиноидов при минимальных потерях биомассы микроводорослей.

Ключевые слова: *Chlorella sorokiniana*, направленное культивирование, УФ-освещенность, каротиноиды

Directed cultivation of *Chlorella sorokiniana* to increase carotenoid synthesis

Tatiana A. Kuznetsova ¹	kuznetsova.ta1@spbstu.ru	 0000-0003-0162-0896
Maria S. Nikitina ¹	emelia21112@gmail.com	 0000-0002-9642-8372
Anna D. Sevastyanova ¹	sevast_ad@spbstu.ru	 0000-0002-8972-5424

¹ Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Novorossiyskaya st., Institute of Biomedical Systems and Biotechnology, 48, St. Petersburg, 184021, Russia

Abstract. *Chlorella sorokiniana* is a promising species for cultivation both in the laboratory cultivator and on an industrial scale. Its biomass is the source of many valuable components, including plastid pigments, which have high antioxidant activity. The metabolism of *Chlorella sorokiniana* is subject to change under the influence of various cultivation conditions. With dosed ultraviolet radiation, a compensatory increase in the synthesis of carotenoids is possible, which prevents oxidative stress. The cultivation of *C. sorokiniana* (strain 211-8k) was carried out in various conditions of illumination: the control version – illumination with a fluorescent lamp; option 1 – dosed periodic ultraviolet exposure every day for 15 min (spectral region of the light flux 280-315 nm (UV-B), intensity 1300 Lux) and further illumination with a fluorescent light; option 2 – ultraviolet irradiation for 30 min (spectral region of the light flux 280-315 nm (UV-B), intensity 1300 Lux) in the stabilization phase. Periodic ultraviolet irradiation negatively affects the growth of *C. sorokiniana* population, which manifests itself only on the 9th day, the biomass yield is significantly reduced. A single UV exposure for 30 minutes leads to a slight decrease in the yield of air-dried biomass, which can be compensated with a further increase in population. Periodic ultraviolet exposure leads to an increase in the synthesis of carotenoids, the yield in terms of dry biomass exceeds the control sample by an average of 30%. A single ultraviolet irradiation for 30 minutes in the stabilization phase leads to a decrease in the content of both chlorophyll and carotenoids in the biomass. Microscopic examination of microalgae populations showed that ultraviolet exposure leads to the appearance of cells with signs of apoptosis: large cells with large vacuoles, a condensed nucleus, and bleached chloroplast. A further direction of the study is the selection of conditions allowing to increase the yield of carotenoids with minimal loss of microalgae biomass.

Keywords: *Chlorella sorokiniana*, directional cultivation, UV light, carotenoids

Для цитирования

Кузнецова Т.А., Никитина М.С., Севастьянова А.Д. Направленное культивирование *Chlorella sorokiniana* с целью увеличения синтеза каротиноидов // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 4. С. 34–39. doi:10.20914/2310-1202-2019-4-34-39

For citation

Kuznetsova T.A., Nikitina M.S., Sevastyanova A.D. Directed cultivation of *Chlorella sorokiniana* to increase carotenoid synthesis. *Vestnik VGUET* [Proceedings of VSUET]. 2019. vol. 81. no. 4. pp. 34–39. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2019-4-34-39

Введение

Микроводоросль *Chlorella sorokiniana* – перспективный продуцент ценных компонентов, успешно культивируемый в лабораторных и производственных условиях [1]. В биомассе *C. sorokiniana* обнаружено высокое содержание ценных компонентов: белков, углеводов, липидов и биологически активных веществ [2].

Содержание пластидных пигментов, хлорофиллов и каротиноидов (3,5% в сухой биомассе) превышает содержание их у наземных растений. Известно, что хлорофиллы и каротиноиды обладают антиоксидантными свойствами [3]. Поэтому биомассу *Chlorella* можно использовать в получении концентратов пигментного комплекса для пищевого производства.

Ряд факторов, влияющих на обмен веществ (в том числе каротиногенез) в клетках микроводорослей в период культивирования, позволяют увеличить синтез метаболитов, что является основой направленного культивирования.

Дозированное ультрафиолетовое излучение (УФ), по мнению ряда авторов, может оказывать и стимулирующее, и угнетающее влияние [4]. Малые дозы УФ в сочетании с фотосинтетически активной радиацией (ФАР) во время роста популяции клеток *C. sorokiniana* могут активизировать компенсаторные фотозащитные механизмы автотрофных одноклеточных водорослей, что предполагает интенсивный синтез каротиноидов [4].

Цель работы – описание влияния дозированного УФ-излучения на процесс культивирования одноклеточных водорослей *C. sorokiniana*, морфофизиологическое состояние популяции микроводорослей и содержание каротиноидов в полученной биомассе.

Материалы и методы

Для исследования использовали *C. sorokiniana* (штамм 211–8k) из коллекции водорослей университета Гёттингена (Culture Collection of Algae at Göttingen University, international acronym SAG). Культивирование проводили в лабораторном биореакторе цилиндрической формы объемом 0,5 л [5, 6] с использованием универсальной питательной среды, содержащей все необходимые макро- и микроэлементы [7].

Перемешивание осуществляли барботированием воздухом с помощью компрессора Xilon AP-001, в режиме 1,5 л/мин. Температурный диапазон культивирования 20–23 °С. Режимы освещенности «день-ночь» (16–8 ч.):

- вариант 1 – контроль, лампа дневного света (ФАР), интенсивность – 2500±200 Лк, T(K) – 400;
- вариант 2 – УФ1, периодическое УФ-облучение в течение 15 мин в сутки ртутной газоразрядной лампой со спектральной областью светового потока 280–315 нм (УФ-В), интенсивность 1300 Лк. Дальнейшее освещение лампой дневного света (интенсивность – 2500±200 Лк, T(K) – 400);
- вариант 3 – УФ2, освещенность лампой дневного света (интенсивность – 2500±200 Лк, T(K) – 400),

ультрафиолетовое облучение в течение 30 мин (со спектральной областью светового потока 280–315 нм (УФ-В), интенсивность 1300 Лк) на завершающей фазе культивирования (стабилизации).

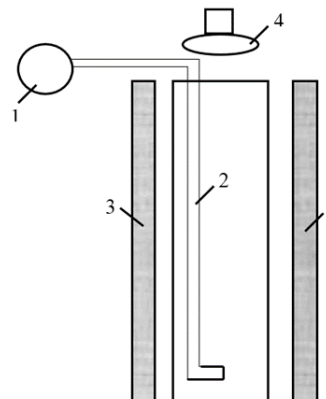


Рисунок 1. Лабораторный фотобиореактор для культивирования микроводоросли *C. sorokiniana*: 1 – насос-аэратор; 2 – трубка подачи воздуха; 3 – лампа дневного света; 4 – источник УФ-излучения

Figure 1. Laboratory photobioreactor for the cultivation of microalgae *C. sorokiniana*: 1 – pump-aerator; 2 – air supply tube; 3 – fluorescent lamp; 4 – UV radiation source

Культивирование проводили в двукратной повторности. Для определения концентрации клеток в суспензии во время культивирования водорослей была найдена линейная зависимость между значениями оптической плотности (при 750 нм, в кювете сравнения – питательная среда) и концентрацией клеток в суспензии. Концентрация клеток в суспензии была определена с помощью камеры Горьева, а оптическая плотность – на спектрофотометре Юнико 1201.

Для определения выхода сухой биомассы отделение жидкой фазы от биомассы проводили центрифугированием в режиме 5000 мин⁻¹ в течение 5 мин. с дальнейшим декантированием надосадочной жидкости. Биомасса в дальнейшем высушивалась на воздухе при 20–23 °С в темном месте. Содержание влаги в воздушно-сухой биомассе не превышало 2%.

Микроскопирование прижизненных препаратов суспензии микроводорослей проводили с помощью микроскопа МИКМЕД-6 с системой визуализации (АО «ЛОМО», Санкт-Петербург). Для обработки микрофотографий использовали программу микроанализ FOTO (АО «ЛОМО», Санкт-Петербург) и Levenguk (производитель «Levenhuk LabZZ»).

Для количественного анализа пигментов (хлорофиллов и каротиноидов) в экстрактах биомассы использовали полосы поглощения пигментов в области 440, 649 и 664 нм и методику авторов [8, 9]. Характеристики состава пигментного комплекса в полученных экстрактах определяли по сумме пигментов и содержанию хлорофиллов и каротиноидов, соотношению хлорофиллов *a* и *b*.

Результаты и обсуждение

На начало культивирования концентрация клеток в культуральной среде – 4,6 млн кл./мл (рисунок 2). Лаг-фаза не выражена или составляет не более 1 сут во всех вариантах эксперимента.

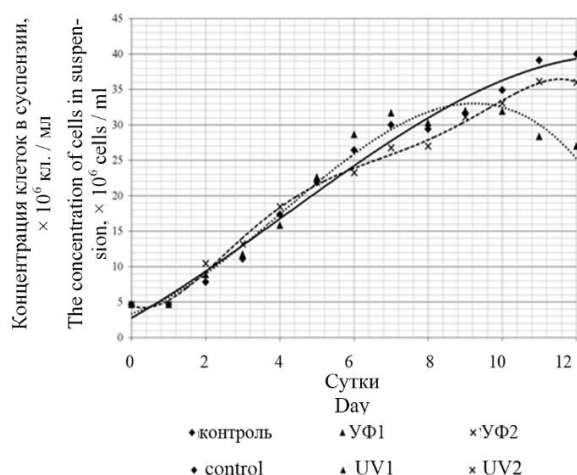


Рисунок 2. Кривые культивирования *C. sorokiniana* в различных условиях освещенности: контроль – освещение лампами дневного света; УФ1 – периодическое воздействие ультрафиолетовым излучением; УФ2 – воздействие ультрафиолетом в фазу стабилизации

Figure 2. Curves of cultivation of *C. sorokiniana* in various lighting conditions: control – fluorescent lighting; UV1 – periodic exposure to ultraviolet radiation; UV2 – exposure to ultraviolet light in the depletion phase)

В контрольном и УФ2 вариантах фаза интенсивного роста составляет 10–11 сут, и сокращена до 8–9 сут в варианте УФ1. Отмечено изменение цвета суспензии водорослей в фазе стабилизации в варианте УФ2, она приобретает желтый оттенок.

На рисунке 3 изображен выход сухой биомассы, полученной в ходе культивирования при разных условиях освещенности.

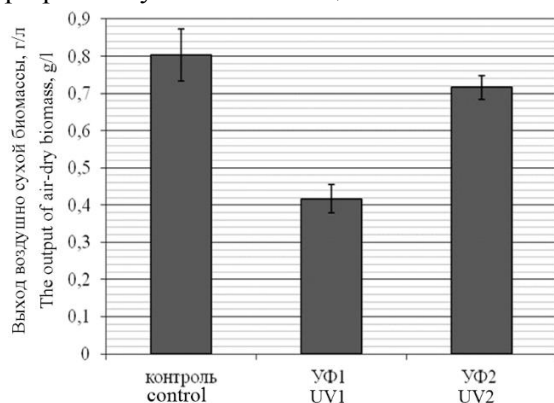


Рисунок 3. Выход воздушно-сухой биомассы *C. sorokiniana*, полученной при культивировании в различных условиях освещенности: УФ1 – периодическое ультрафиолетовое воздействие; УФ2 – воздействие ультрафиолетом в фазу стабилизации

Figure 3. The yield of air-dry biomass obtained during cultivation under various lighting conditions: UV1 – periodic ultraviolet exposure; UV2 – exposure to ultraviolet in the stabilization phase

При однократном воздействии УФ-облучения (вариант УФ2) выход биомассы достоверно не отличается от контрольного варианта,

а при периодическом УФ-облучении (вариант УФ1) приводит к существенному снижению выхода биомассы в среднем на 48%. Анализ кривой культивирования показал, что уменьшение содержания биомассы происходит в заключительную фазу культивирования после 9 сут.

На рисунке 4 представлен спектр поглощения пигментного комплекса, экстрагированного 96%-ным этанолом (ГОСТ 5962–2013). При анализе спектров поглощения отмечено две полосы поглощения в сине-фиолетовой области 380–500 нм и в красной области 640–670 нм. Пики при 420 (1) и 664 нм (5) соответствуют хлорофиллу *a* [10]. Хлорофиллу *b* соответствуют пики 453, 649 нм, плечо (4) при 420 нм описано для протохлорофилла [11]. Для каротиноидов отмечена полоса поглощения в области 420–480 нм, пики 440,5 (2) и 470 нм (3) описаны для каротиноидов.

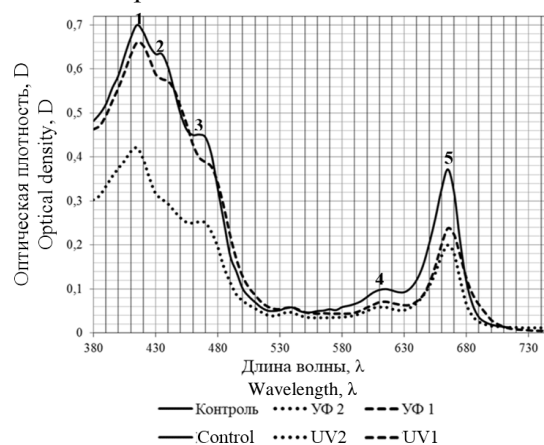


Рисунок 4. Спектр поглощения этанольных экстрактов пигментов из воздушно-сухой биомассы *C. sorokiniana*, полученной при культивировании в различных условиях освещенности: контроль; УФ1 – периодическое ультрафиолетовое воздействие; УФ2 – воздействие ультрафиолетом в фазу стабилизации

Figure 4. Absorption spectrum of ethanol extracts of pigments from air-dry biomass *C. sorokiniana* obtained by cultivation under various lighting conditions: control; UV1 – periodic ultraviolet exposure; UV2 – exposure to ultraviolet light in the stabilization phase.

В таблице 1 представлены данные по содержанию пластидных пигментов в воздушно-сухой биомассе полученных образцов в различных условиях освещенности при культивировании микроводорослей *C. sorokiniana*.

Наибольшее содержание суммы пигментов отмечено для контрольного варианта, в вариантах с УФ-облучением отмечено уменьшение содержания суммы пигментов в среднем на 26,9% (вариант УФ1) и на 8,5% (вариант УФ2). В вариантах с УФ-облучением отмечено наиболее существенное снижение содержания вспомогательного хлорофилла *b*, соответственно увеличивалось соотношение Ch *a*/ Ch *b*.

Таблица 1.
Содержание пластидных пигментов в образцах воздушно-сухой биомассы *C. sorokiniana*

Table 1.

Plastid pigment content in air-dried biomass samples of *C. sorokiniana*

Содержание пигментов, мг/г сухой биомассы The pigment content, mg/g dry biomass	Образцы биомассы, полученные в различных условиях культивирования Biomass samples obtained under various cultivation conditions		
	Контроль Control	УФ 1 UV 1	УФ 2 UV 2
Хлорофилл <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i>	14,78±0,21	9,94±0,23 **	13,89±0,45**
Хлорофилл <i>b</i> Chlorophyll <i>b</i>	7,73±0,17	4,13±0,11 **	6,79±0,35**
Сумма каротиноидов Sum of carotenoids	4,24±0,14	5,49±0,10 **	3,80±0,12**
Сумма пигментов Pigment amount	26,76±0,31	19,56±0,37**	24,48±0,85**
Доля каротиноидов от суммы пигментов, % The proportion of carotenoids from the amount of pigments, %	15,84±0,44	28,10±0,37**	15,60±0,42**
Соотношение хлорофиллов <i>a</i> / <i>b</i> The ratio of chlorophyll <i>a</i> / <i>b</i>	1,92±0,05	2,42±0,05**	2,06±0,05

Примечание: УФ1 – периодическое ультрафиолетовое воздействие; УФ2 – воздействие ультрафиолетом в фазу стабилизации, ** – достоверные отличия при уровне вероятности 0,99.

Note: UV1 – periodic ultraviolet exposure; UV2 – exposure to ultraviolet light in the stabilization phase, ** – significant differences at a probability level of 0.99.

Длительное УФ-облучение вызывает фотоповреждение белков и фосфолипидов плазматических мембран: окисление липидов мембран по свободнорадикальному механизму с образованием гидропероксидов с последующим их фотохимическим расщеплением и получением стабильных конечных продуктов. Ранее было показано, что влияние острых доз УФ-излучения на клетки водорослей сопровождается повышением уровня защитной антиоксидантной активности водорослей [12].

В большинстве случаев фотоповреждения являются следствием генерации избытка триплетно возбужденного Хл, способного взаимодействовать с O₂ – продуктом окислительного фотосинтеза. В результате образуются химически реактивные формы синглетного O₂. Фотопротекторная роль Хл зависит от функции ПБК. Другой способ заключается в эффективном переносе энергии от триплетно возбужденного Хл на каротиноиды, которые рассеивают энергию в виде тепла [3].

Каротиноиды в ряде случаев являются важным структурным элементом трансмембранных комплексов, которые наряду с другими компонентами обеспечивают стабильность их структуры и эффективное выполнение комплексами их основной функции при фотосинтезе [14].

Фотозащитная функция каротиноидов связана со способностью их гасить энергию

возбуждения электрона за счет делокализации электрона сопряженной системой связей [14].

Периодическое УФ-облучение приводит к усилению каротиногенеза. В биомассе возрастало содержание суммы каротиноидов по сравнению с контролем в среднем на 29,5%, при более длительном однократном воздействии УФ-облучения в фазу стабилизации наблюдается уменьшение содержания суммы каротиноидов в среднем на 10,4%.

На рисунке 5 представлена микроскопическая картина популяции клеток *C. sorokiniana* в фазу стабилизации, полученных при периодическом (УФ1) и однократном длительном УФ-облучении (УФ2).

При исследовании прижизненных препаратов (в 10 полях зрения) в вариантах УФ1 (рисунок 5 б) и УФ2 (рисунок 5 с) отмечали появление обесцвеченных клеток с большой вакуолью и ядром с конденсированным хроматином, морфологически измененные клетки были крупнее остальных. Также отмечали образование флюидов, способствующих седиментации клеток.

По литературным данным появление морфологически измененных клеток с крупными вакуолями, разрушенным хлорофиллом характерно для клеток при воздействии температурного и осмотического стрессового фактора, а также при УФ-облучении, что характерно для апоптоза [15, 16].

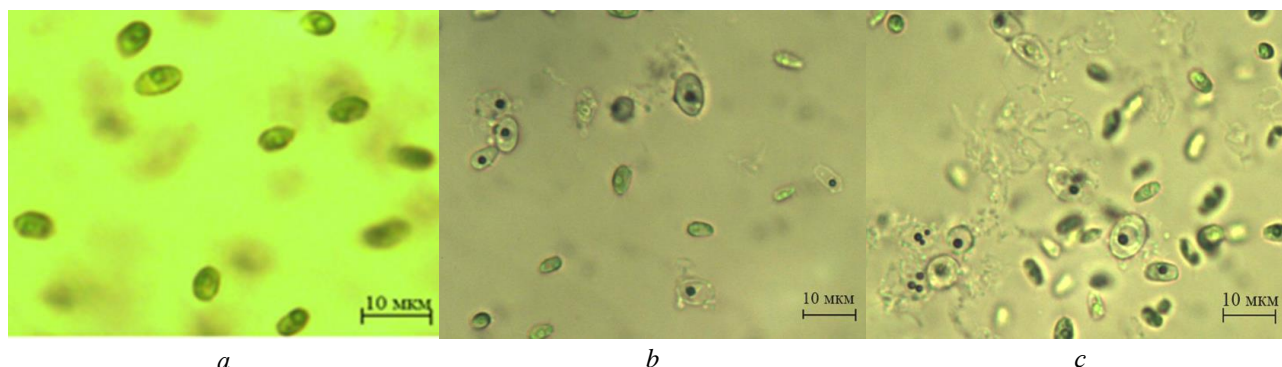


Рисунок 5. Микроскопическая картина популяций *C. sorokiniana* в фазу стабилизации, полученных в разных условиях культивирования: *a* – контроль; *b* – периодическое ультрафиолетовое воздействие; *c* – воздействие ультрафиолетом в фазу стабилизации

Figure 5. Microscopic picture of *C. sorokiniana* populations in the stabilization phase obtained under different cultivation conditions: *a* – control; *b* – periodic ultraviolet exposure; *c* – exposure to ultraviolet light in the stabilization phase

Закключение

Таким образом, при периодическом УФ-облучении наблюдается снижение количества клеток водорослей в суспензии на 9-е сут, соответственно и выход биомассы существенно снижается по сравнению с контролем. Однократное УФ-облучение в течение 30 мин приводит к незначительному снижению выхода воздушно-сухой биомассы, что при дальнейшем росте популяции может быть скомпенсировано.

Периодическое УФ-облучение приводит к активации каротиногенеза, выход суммы каротиноидов в пересчете на сухую биомассу превышает контрольный вариант в среднем на 30%.

Однократное ультрафиолетовое облучение в течение 30 мин в фазу стабилизации приводит к снижению содержания в биомассе как хлорофилла, так и каротиноидов.

Микроскопическое исследование популяций микроводоросли показало, что УФ-облучение приводит к появлению клеток с признаками апоптоза: крупные клетки с большими вакуолями, конденсированным ядром, обесцвеченным хлоропластом.

Дальнейшим направлением исследования является подбор условий, позволяющих увеличить выход каротиноидов при минимальных потерях биомассы микроводорослей.

Литература

- 1 Lizzul A.M., Lekuona-Amundarain A., Purton S., Cintra L. Campos Characterization of *Chlorella sorokiniana*, UTEX 1230 // Biology. 2018. № 7 (25). URL: www.mdpi.com/journal/biology
- 2 Belkoura M., Benider A., Dauta A. Influence de la température, de l'intensité lumineuse et du stade de croissance sur la composition biochimique de *Chlorella sorokiniana* Shihira & Krauss // Annls Limnol. 1997. № 33 (1). P. 3–11.
- 3 Дымова О.В., Головки Т.К. Фотосинтетические пигменты: функционирование, экология, биологическая активность // Известия Уфимского научного центра РАН. 2018. № 3 (4). С. 5–16.
- 4 Gracia L., Cianca K., Montero L. et al. Carotenoids production of the microalgae *Chlorella sorokiniana* response to stress induced by uv-a radiation // Sociedad Latinoamericana de biotecnologia ambiental y algal. 2015. P. 1–5.
- 5 Politaeva N., Smyatskaya Y., Trukhina E., Ovchinnikov F. Impact of various physical exposures on *Chlorella Sorokiniana* microalgal cultivation // International Journal of Applied Engineering Research. 2017. № 12 (21). P. 11488–11492.
- 6 Пат. № 2668162, RU, C12N 1/12, A01G 33/00, C12M 1/02, C12M 1/36, Способ культивирования микроводоросли *Chlorella* / Политаева Н.А., Базарнова Ю.Г., Кузнецова Т.А., Трухина Е.В., Смятская Ю.А. Патентообладатель: ФГАОУ ВО «СПбПУ». № 2017142638; Заявл. 06.12.2017; Оpubл. 26.09.2018, Бюл. № 27.
- 7 Crofcheck C., Shea A. et al. Influence of media composition on the growth rate of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus* utilized for CO₂ mitigation // J Biochem Tech. 2012. № 4 (2). P. 589–594.
- 8 Nayek S., Haque C.I., Nishika J., Suprakash R. Spectrophotometric Analysis of Chlorophylls and Carotenoids from Commonly Grown Fern Species by Using Various Extracting Solvents // Research Journal of Chemical Sciences. 2014. V. 4 (9). P. 63–69.
- 9 Пат. № 2695879, RU, A23J 3/20. Способ получения пигментного комплекса из биомассы одноклеточных водорослей рода *Chlorella* / Базарнова Ю.Г., Кузнецова Т.А., Смятская Ю.А. № 2018142406; Заявл. 01.12.2018; Оpubл. 29.07.2019, Бюл. № 22.
- 10 Tarchevskiy A. The main principles of photosynthesis. Edition of the Kazan State University. 150 p.
- 11 Булда О.В., Рассадина В.В., Алексейчук Г.Н., Ламан Н.А. Спектрофотометрический метод определения содержания каротинов, ксантофиллов и хлорофиллов в экстрактах семян растений // Физиология растений. 2008. Т. 55. № 4. С. 604–611.
- 12 Али-заде Г.И. Влияние УФ-С и УФ-В излучений на первичные процессы фотосинтеза и каталазную активность в клетках *Dunaliella* // Современные проблемы науки и образования. 2009. № 4. С. 18–25.
- 13 Москаленко А.А., Барышников В.В., Журавлева З.А. и др. Структурная роль каротиноидов в фотосинтезе // Информационный бюллетень РФФИ. Науки о земле. 1995. № 3.
- 14 Шашкина М.Я., Шашкин П.Н., Сергеев А.В. Каротиноиды как основа для создания лечебно-профилактических средств // Российский биотерапевтический журнал. 2009. Т. 8. № 4. С. 91–98.

- 15 Jimenez C., Capasso J.M., Charles L. Edelstein C.L. et al. Different ways to die: cell death modes of the unicellular chlorophyte *Dunaliella viridis* exposed to various environmental stresses are mediated by the caspase-like activity DEVDase // Journal of Experimental Botany. 2009. V. 60. № 3. P. 815–828. doi:10.1093/jxb/ern330
- 16 Zuppin A., Gerotto C., Baldan B. Programmed Cell Death and Adaptation: Two Different Types of Abiotic Stress Response in a Unicellular Chlorophyte // Plant Cell Physiol. 2010. V. 51. № 6. P. 884–895. doi:10.1093/pcp/pcq069

References

- Lizzul A.M., Lekuona-Amundarain A., Purton S., Cintra L. Campos Characterization of *Chlorella sorokiniana*, UTEX 1230. Biology. 2018. no. 7 (25). Available at: www.mdpi.com/journal/biology
- Belkoura M., Benider A., Dauta A. Influence of temperature, light intensity and growth stage on the biochemical composition of *Chlorella sorokiniana* Shihira & Krauss. Annls Limnol. 1997. no. 33 (1). pp. 3–11. (in French).
- Dymova O.V., Golovko T.K. Photosynthetic pigments: functioning, ecology, biological activity. Bulletin of the Ufa Scientific Center for Wounds. 2018. no. 3 (4). pp. 5–16. (in Russian).
- Gracia L., Cianca K., Montero L. et al. Carotenoids production of the microalgae *Chlorella sorokiniana* response to stress induced by uv-a radiation. Sociedad Latinoamericana de biotecnologia ambiental y algal. 2015. pp. 1–5.
- Politaeva N., Smyatskaya Y., Trukhina E., Ovchinnikov F. Impact of various physical exposures on *Chlorella Sorokiniana* microalgae cultivation. International Journal of Applied Engineering Research. 2017. no. 12 (21). pp. 11488–11492.
- Politaeva N.A., Bazarnova Yu.G., Kuznetsova T.A., Trukhina E. V., Smyatskaya Yu.A. Method for the cultivation of microalgae *Chlorella*. Patent RF, no. 2668162, 2018.
- Croftcheck C., Shea A. et al. Influence of media composition on the growth rate of *Chlorella vulgaris* and *Scenedesmus acutus* utilized for CO2 mitigation. J Biochem Tech. 2012. no. 4 (2). pp. 589–594.
- Nayek S. Haque C.I., Nishika J., Suprakash R. Spectrophotometric Analysis of Chlorophylls and Carotenoids from Commonly Grown Fern Species by Using Various Extracting Solvents. Research Journal of Chemical Sciences. 2014. vol. 4 (9). pp. 63–69.
- Bazarnova Yu.G., Kuznetsova T.A., Smyatskaya Yu.A. A method of obtaining a pigment complex from the biomass of unicellular algae of the genus *Chlorella*. Patent RF, no. 2695879, 2019.
- Tarchevskiy A. The main principles of photosynthesis. Edition of the Kazan State University. 150 p.
- Bulda O.V., Rassadina V.V., Alekseychuk G.N., Laman N.A. Spectrophotometric method for determining the content of carotenes, xanthophylls and chlorophylls in plant seed extracts. Plant Physiology. 2008. vol. 55. no. 4. pp. 604–611. (in Russian).
- Ali-zade G.I. The influence of UV-C and UV-B radiation on the primary processes of photosynthesis and catalase activity in *Dunaliella* cells. Modern problems of photosynthesis and education. 2009. no. 4. pp. 18–25. (in Russian).
- Moskalenko A.A., Baryshnikov V.V., Zhuravleva Z.A. et al. Structural role of carotenoids in photosynthesis. RFBR Newsletter. Earth sciences. 1995. no. 3. (in Russian).
- Shashkina M.Ya., Shashkin P.N., Sergeev A.V. Carotenoids as the basis for the creation of therapeutic and prophylactic agents. Russian biotherapeutic journal. 2009. no. 4. vol. 8. pp. 91–98. (in Russian).
- Jimenez C., Capasso J.M., Charles L. Edelstein C.L. et al. Different ways to die: cell death modes of the unicellular chlorophyte *Dunaliella viridis* exposed to various environmental stresses are mediated by the caspase-like activity DEVDase. Journal of Experimental Botany. 2009. vol. 60. no. 3. pp. 815–828. doi:10.1093/jxb/ern330
- Zuppin A., Gerotto C., Baldan B. Programmed Cell Death and Adaptation: Two Different Types of Abiotic Stress Response in a Unicellular Chlorophyte. Plant Cell Physiol. 2010. vol. 51. no. 6. pp. 884–895. doi:10.1093/pcp/pcq069

Сведения об авторах

Татьяна А. Кузнецова к.б.н., доцент, институт биомедицинских систем и биотехнологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Новороссийская, 48, г. Санкт-Петербург, 184021, Россия, kuznetsova.ta1@spbstu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0162-0896>

Мария С. Никитина магистр, институт биомедицинских систем и биотехнологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Новороссийская, 48, г. Санкт-Петербург, 184021, Россия, emelia211112@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9642-8372>

Анна Д. Севастьянова ассистент, институт биомедицинских систем и биотехнологий, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Новороссийская, 48, г. Санкт-Петербург, 184021, Россия, sevast_ad@spbstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8972-5424>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Tatiana A. Kuznetsova Cand. Sci. (Biol.), associate professor, Institute of Biomedical Systems and Biotechnology, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, st. Novorossiyskaya, 48, St. Petersburg, 184021, Russia, kuznetsova.ta1@spbstu.ru
<https://orcid.org/0000-0003-0162-0896>

Maria S. Nikitina master student, Institute of Biomedical Systems and Biotechnology, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, st. Novorossiyskaya, 48, St. Petersburg, 184021, Russia, emelia211112@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-9642-8372>

Anna D. Sevastyanova assistant, Institute of Biomedical Systems and Biotechnology, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, st. Novorossiyskaya, 48, St. Petersburg, 184021, Russia, sevast_ad@spbstu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8972-5424>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/11/2019	После редакции 21/11/2019	Принята в печать 02/12/2019
Received 12/11/2019	Accepted in revised 21/11/2019	Accepted 02/12/2019