

Е. В. Каширских, Л. К. Асякина, Д. Д. Надцонов

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Поступила в редакцию 15.11.2021 г.

Рецензия от 16.12.2021 г.

88

Микроводоросли распространены в почвенных, морских и пресноводных экологических системах. Они способны в процессе жизнедеятельности накапливать ценные биологически активные вещества. В настоящее время микроводоросли изучены недостаточно. В связи с этим целью данной статьи было исследование физико-химических свойств микроводорослей Балтийского моря в Калининградской области. Количество белка определяли по методу Бредфорда, липидов – по методу Фолча. В результате проведенной работы доказано, что максимальное значение показателя – оптическая плотность – отмечено у микроводорослей *Chlorella vulgaris*. Наибольшей плотностью суспензии отличаются *Pleurochrysis carterae* и *Arthrospira platensis* после 7 суток культивирования, наименьшей – *Chlorella vulgaris*. Высокие значения динамической вязкости обнаружены у суспензий микроводорослей *Dunaliella salina* и *Pleurochrysis carterae*. Суспензия микроводорослей *Arthrospira platensis* характеризуется наименьшим значением динамической вязкости. Установлено, что активная кислотность суспензии всех исследуемых образцов микроводорослей имеет разные значения, но все исследуемые микроводоросли растут и активно развиваются в щелочной среде. Показано, что при культивировании клеток микроводорослей наибольшее количество белка накапливается в *Arthrospira platensis*, а оказывается примерно одинаковым в *Dunaliella salina* и *Chlorella vulgaris*. Из вторичных метаболитов микроводорослей планируется создавать БАДы и функциональные продукты питания.

*Microalgae are common in soil, marine and freshwater ecological systems. They are able to accumulate valuable biologically active substances in the course of life. At present, microalgae have not been studied well enough. Thus, the purpose of this project was to study the physicochemical properties of microalgae of the Baltic Sea in the Kaliningrad region. The amount of protein was determined by the Bradford method, while lipids were assessed by the Folch method. As a result of the work, it was proved that the maximum value of the indicator – optical density – was noted in the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Pleurochrysis carterae* and *Arthrospira platensis* are characterized by the highest suspension density after 7 days of cultivation. The smallest is *Chlorella vulgaris*. High values of dynamic viscosity were found in suspensions of *Dunaliella salina* and *Pleurochrysis carterae* microalgae. Suspension of microalgae *Arthrospira platensis* is characterized by the lowest value of dynamic viscosity. It has been established that the value of the active acidity of the suspension of all the studied samples of microalgae have different values, but*



all the studied microalgae is found to grow and actively develop in an alkaline environment. It has been shown that during the cultivation of microalgae cell culture, the largest amount of protein accumulates in *Arthrospira platensis*. The amount of protein in the cultivation of *Dunaliella salina* and *Chlorella vulgaris* cell cultures was approximately the same. It is planned to create dietary supplements and functional foods from secondary metabolites of microalgae.

Ключевые слова: микроводоросли, физико-химические свойства, белок, липиды, углеводы, *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Nostoc sp.*, *Dunaliella salina*, *Pleurochrysis carterae*

Keywords: microalgae, physicochemical properties, protein, lipids, carbohydrates, *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Nostoc sp.*, *Dunaliella salina*, *Pleurochrysis carterae*

Введение

Микроводорослями называют группу микроорганизмов, распространенных в почвенных, морских и пресноводных экологических системах и характеризующихся способностью выработки органических веществ в процессе жизнедеятельности (фотосинтеза) [1–3].

Микроводоросли состоят из широкого спектра автотрофных организмов, которые растут в процессе фотосинтеза так же, как и растения [4; 5]. Классификация микроводорослей постоянно пересматривается в связи с новыми генетическими данными [6]. Тем не менее различают две основные группы: прокариотические и эукариотические [4].

Прокариотическими микроводорослями являются цианобактерии (сине-зеленые водоросли), таксономия которых включает пять порядков: хроококковые (*Chroococcales*), осцилляториевые (*Oscillatoriales*), ностокковые (*Nostocales*), стигонемовые (*Stigonematales*) и плеврокапсовые (*Pleurocapsales*) [7–9]. Прохлорофиты (*Prochlorales*), или свободно действующие хлоропласты, – еще одна группа цианобактерий, которые представляют собой искусственную группу, основанную на их различной пигментации, происходящей из-за отсутствия фитобилипротеинов и, в большинстве случаев, из-за присутствия хлорофиллов а и b [10; 11]. Одной из основных характеристик цианобактерий является их быстрое поглощение и накопление питательных веществ и соединений, таких как фосфаты, цианофицин (полимер аспарагиновой кислоты и аргинина) и разветвленный α -1,4-полиглюкан [12–14]. Некоторые из этих микроорганизмов могут продуцировать нейротоксины и гепатотоксины, тогда как другие вырабатывают терапевтические соединения (например, противовирусные препараты, иммуномодуляторы, ингибиторы) [15]. Наиболее важные цианобактерии, используемые в биотехнологии, – это *Spirulina (Arthrospira) platensis*, *Nostoc commune* и *Aphanizomenon flos-aquae* [5].

Микроводоросли изучены значительно меньше, чем макроводоросли. Их преимущества связаны с более быстрым ростом, более высокой фотосинтетической эффективностью и возможностью культивирования в производственных условиях. Они дают возможность для создания новых пищевых продуктов и их применения в пищевой промышленности и здравоохранении [16]. Кроме того, биоразнообразие микроводо-



рослей позволит увеличить количество различных источников биологически активных веществ, таких как углеводы, липиды, белки и пигменты. В связи с увеличивающимся спросом на биологически активные вещества микроводорослей возникает проблема их культивирования [17]. Для подбора рациональных режимов культивирования необходимо изучить их физико-химические свойства. В связи с этим актуальность данного исследования очевидна.

Новизна данного исследования заключается в том, что впервые были выделены микроводоросли Балтийского моря в Калининградской области и изучены их физико-химические свойства: активная кислотность, оптическая плотность суспензии, плотность суспензии, динамическая вязкость, содержание сухих веществ, цвет и запах суспензии.

Цель данной работы – изучение их физико-химических свойств микроводорослей Балтийского моря в Калининградской области.

Объекты и методы исследования

При проведении исследований изучали химический состав и физико-химические свойства выбранных объектов: пяти штаммов микроводорослей *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Pleurochrysis carterae*. Для этого осуществляли культивирование микроводорослей и наработку их биомассы. Этот процесс проводили при комнатной температуре (21 – 23 °С) и постоянном освещении 30 – 50 мкЕ люминисцентными лампами с теплым белым светом в течение 2, 4 и 7 суток.

При культивировании штаммов микроводоросли *Chlorella vulgaris* (С-11, С-38) использовали среду Тамия; для культивирования и наработки биомассы микроводоросли *Arthrospira platensis* (В-256, В-287) – питательную среду Заррука; для наработки биомассы микроводосли *Pleurochrysis carterae* – питательную среду F/2 и специальную питательную среду для *Chlorella vulgaris* С-66. Питательные среды стерилизовали путем автоклавирования, микроэлементы среды Заррука стерилизовали фильтрацией через фильтр с диаметром пор 0,22 мкм и вносили после автоклавирования в охлажденные до комнатной температуры питательные среды. Культивирование микроводорослей вели до получения необходимого количества биомассы исследуемых образцов *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Pleurochrysis carterae*.

Для микроводорослей *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Pleurochrysis carterae* изучали физико-химические свойства. В качестве основных показателей, характеризующих физико-химические свойства исследуемых образцов, выбрали активную кислотность, оптическую плотность суспензии, плотность суспензии, динамическую вязкость, содержание сухих веществ, цвет и запах суспензии [18].

Такие показатели, как оптическая плотность суспензии и плотность суспензии, характеризуют накопление биомассы микроводорослями. Оптическую плотность суспензии на разных этапах культивирования изучали с помощью двухлучевого спектрофотометра UV-3600 (Shimadzu, Япония). Измерения проводили при длине волны 750 нм в стеклянных кюветах 1,0 см. В качестве контроля использовали дистиллированную воду. Если показания прибора превышали рабочий диапазон, пробы разбавляли дистиллированной водой.



Также для оценки накопления биомассы микроводорослей измеряли сухую массу проб, определение производилось методом фильтрации через бумажные фильтры, высушенные предварительно в сушильном шкафу до постоянной массы. Пробы суспензии отбирали стерильными медицинскими шприцами объемом 100 мл. Далее фильтровали под вакуумом с помощью колбы Бунзена и воронки Бюхнера. После фильтрации промывали фильтры дистиллированной водой во избежание погрешности, которую могут давать соли, осажденные из питательной среды на фильтре. Затем фильтры высушивали в сушильном шкафу до постоянной массы. Прирост биомассы микроводорослей определяли по разнице масс сухих фильтров до и после фильтрации.

Для определения рН суспензий микроводорослей использовали стационарный рН-метр рН 213 (HANNA, Германия). Плотность суспензий определяли с помощью ареометра в соответствии с ГОСТ 18481-81. Вязкость суспензий измеряли при помощи капиллярного вискозиметра типа ВПЖ-2 в соответствии с ГОСТ 29226-91.

Экстракцию липидов микроводорослей проводили по методу Фолча. Для этого использовали 2 мл смеси хлороформ : метанол в объемном соотношении 2:1 на 100 мг сухой биомассы, затем проводили ультразвуковую обработку в течение 30 мин при 25 °С. К смеси добавляли 0,25 объема 0,9 % раствора NaCl и интенсивно перемешивали. После расслоения фаз органическую фазу отделяли, упаривали до постоянной массы и взвешивали. Содержание липидов W_L (%), определяли по формуле

$$W_L \geq \frac{m_L}{m_b} \cdot 100, \quad (1)$$

где m_L — масса экстрагированных липидов, m_b — масса сухой биомассы.

Определение содержания белка в биомассе микроводорослей проводили с помощью метода Бредфорда. Для экстракции белка к 10 мг сухой биомассы микроводорослей добавляли 10 мл 0,5 М раствора гидроксида натрия и выдерживали на водяной бане в течение 10 мин при 80 °С. Полученный экстракт центрифугировали в течение 20 мин при скорости вращения ротора 3900 об./мин. Супернатант переносили в чистую пробирку. Экстракцию повторяли, супернатанты объединяли. Количество выделившегося белка определяли спектрофотометрически при длине волны 595 нм. Калибровочный график строили на основе бычьего сывороточного альбумина (БСА). Калибровочные растворы готовились в 0,5 М гидроксиде натрия. Процентное содержание белка определяли относительно веса сухой биомассы микроводорослей [19].

Содержание углеводов в биомассе микроводорослей определяли по методу Миллера с 3,5-динитросалициловой кислотой. Для определения моносахаридов 0,2 г сухой биомассы микроводорослей добавляли в 20 мл 1,5 М хлороводородной кислоты и нагревали полученную смесь в течение 20 мин при 120 °С. Далее в мерные колбы на 25 мл пипеткой вносили 1 мл испытуемого раствора и 2 мл реактива динитросалициловой кислоты и быстро перемешивали. Колбы помещали в кипящую водяную баню и кипятили в течение 5 мин. Затем образцы охлаждали



до комнатной температуры, доводили до метки дистиллированной водой, тщательно перемешивали и измеряли оптическую плотность растворов на двухлучевом спектрофотометре UV-3600 (Shimadzu, Япония) при длине волны 530 нм.

Результаты и их обсуждение

Результаты изучения физико-химических свойств микроводорослей *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Pleurochrysis carterae* представлены в таблице 1.

92

В процессе изучения физико-химических свойств микроводорослей *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Pleurochrysis carterae*, выделенных из акватории Балтийского моря (Калининградская область), установлено, что все объекты исследования на начальных этапах культивирования не имеют запаха, а при увеличении продолжительности процесса наработки биомассы появляется слабый травянистый запах. Цвет суспензии при культивировании у всех исследуемых образцов наблюдался зеленый. У микроводорослей *Chlorella vulgaris* в первые 4 суток цвет был салатový, но при увеличении продолжительности культивирования происходило потемнение цвета суспензии до зеленого.

Показано, что при увеличении процесса культивирования оптическая плотность суспензии, плотность суспензии и динамическая вязкость увеличиваются, что свидетельствует о том, что в процессе культивирования микроорганизмов происходит накопление биомассы [20]. Максимальное значение показателя — оптическая плотность (OD 750) отмечено у микроводорослей *Chlorella vulgaris* (величина оптической плотности (OD 750) составила $1,13 \pm 0,03$ кг/м³). Микроводоросли *Arthrospira platensis* и *Pleurochrysis carterae* показали практически равное значение. Так, показатель «оптическая плотность» для микроводорослей *Arthrospira platensis* имеет значение $0,84 \pm 0,02$ кг/м³, а микроводоросли *Pleurochrysis carterae* характеризуются значением оптической плотности $0,86 \pm 0,02$ кг/м³. Плотность суспензии для микроводорослей *Arthrospira platensis* после 7 суток культивирования составила $925,28 \pm 27,75$ кг/м³, что значительно больше, чем плотность суспензии микроводорослей *Chlorella vulgaris* ($812,26 \pm 24,36$ кг/м³), но меньше, чем значение исследуемого показателя у суспензии микроводоросли *Pleurochrysis carterae* ($987,20 \pm 29,61$ кг/м³).

Изучение динамической вязкости суспензий микроводорослей *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Pleurochrysis carterae*, выделенных из акватории Балтийского моря (Калининградская область), свидетельствует о том, что наименьшее значение вязкости отмечено у суспензии микроводорослей *Chlorella vulgaris*: исследуемая величина после 7 суток культивирования достигла значения $(0,81 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$ Па·с. Высокую динамическую вязкость среди исследуемых образцов удалось обнаружить у суспензий микроводорослей *Pleurochrysis carterae*. Так, динамическая вязкость суспензии микроводоросли *Pleurochrysis carterae* составила $(1,04 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$ Па·с. Суспензия микроводорослей *Arthrospira platensis* характеризовалась значением динамической вязкости $(0,94 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Таблица 1

Физико-химические свойства микроводорослей при 2, 4-х и 7-х сутках культивирования

Показатель	Значение											
	<i>Arthrospira platensis</i>			<i>Pleurochrysis carterae</i>			<i>Chlorella vulgaris</i>					
Продолжительность культивирования, сут	2	4	7	2	4	7	2	4	7	2	4	7
	0,28±0,01	0,66±0,01	0,84±0,02	0,27±0,01	0,46±0,01	0,86±0,02	0,24±0,01	0,95±0,02	1,13±0,03	7,65±0,23	7,94±0,23	8,45±0,25
Оптическая плотность (OD 750)	9,70±0,29	10,31±0,30	11,54±0,34	9,65±0,28	10,20±0,30	11,62±0,34	7,65±0,23	7,94±0,23	8,45±0,25	748,30±22,44	794,15±23,82	812,26±24,36
	741,27±22,23	898,17±26,94	925,28±27,75	785,30±23,55	904,74±27,14	987,20±29,61	0,75±0,02	0,78±0,02	0,81±0,02	0,45±0,01	0,46±0,01	0,48±0,01
pH	0,74±0,02	0,82±0,02	0,94±0,02	0,69±0,02	0,80±0,02	1,04±0,03	0,75±0,02	0,78±0,02	0,81±0,02	0,45±0,01	0,46±0,01	0,48±0,01
	0,51±0,01	0,54±0,01	0,56±0,01	0,52±0,01	0,53±0,01	0,55±0,01	0,45±0,01	0,46±0,01	0,48±0,01	Салатовый	Зеленый	Зеленый
Плотность, кг/м ³	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Салатовый	Зеленый	Зеленый	Салатовый	Зеленый	Зеленый
	Без запаха	Слабый травянистый	Слабый травянистый	Без запаха	Слабый травянистый	Слабый травянистый	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха
Динамическая вязкость, 10 ⁻³ Па·с	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Салатовый	Зеленый	Зеленый	Салатовый	Зеленый	Зеленый
	Без запаха	Слабый травянистый	Слабый травянистый	Без запаха	Слабый травянистый	Слабый травянистый	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха
Содержание сухих веществ, %	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Салатовый	Зеленый	Зеленый	Салатовый	Зеленый	Зеленый
	Без запаха	Слабый травянистый	Слабый травянистый	Без запаха	Слабый травянистый	Слабый травянистый	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха
Цвет	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Салатовый	Зеленый	Зеленый	Салатовый	Зеленый	Зеленый
	Без запаха	Слабый травянистый	Слабый травянистый	Без запаха	Слабый травянистый	Слабый травянистый	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха
Запах	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Зеленый	Салатовый	Зеленый	Зеленый	Салатовый	Зеленый	Зеленый
	Без запаха	Слабый травянистый	Слабый травянистый	Без запаха	Слабый травянистый	Слабый травянистый	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха	Без запаха



Рекордное содержание сухих веществ среди исследуемых образцов отмечено у микроводорослей *Arthrospira platensis* (массовая доля сухих веществ составила $0,56 \pm 0,01$ %) и *Pleurochrysis carterae* (содержание сухих веществ – $0,55 \pm 0,01$ %).

Согласно результатам анализа физико-химических свойств в биомассе микроводорослей *Chlorella vulgaris* содержание сухих веществ было не более $0,48 \pm 0,01$ %.

Значение активной кислотности суспензии у всех исследуемых образцов различно, но установлено, что все микроводоросли растут и активно развиваются в щелочной среде. Так, значение активной кислотности суспензии микроводорослей *Arthrospira platensis* достигает значения $11,54 \pm 0,34$ ед. Микроводоросли *Pleurochrysis carterae* (при условиях культивирования при температуре $21 - 23$ °С и постоянном освещении $30 - 50$ мкЕ люминисцентными лампами с теплым белым светом в течение 7 суток) имели значение рН суспензии $11,62 \pm 0,34$. Микроводоросли *Chlorella vulgaris* показали значение активной кислотности суспензии $7,65 \pm 0,23$. Химический состав исследуемых микроводорослей представлен в таблице 2.

Таблица 2

Химический состав сухого вещества микроводорослей

Показатель	<i>Arthrospira platensis</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Pleurochrysis carterae</i>
Белки, %	$60,03 \pm 1,80$	$56,20 \pm 1,68$	$43,32 \pm 1,29$
Липиды, %	$7,23 \pm 0,21$	$16,24 \pm 0,48$	$19,61 \pm 0,58$
Углеводы, %	$11,44 \pm 0,34$	$11,22 \pm 0,33$	$11,53 \pm 0,34$
Зола, %	$7,13 \pm 0,21$	$6,54 \pm 0,19$	$7,38 \pm 0,22$
Пищевые волокна, %	$3,58 \pm 0,10$	$3,52 \pm 0,10$	$3,46 \pm 0,10$
Хлорофилл а, мг/г	$6,48 \pm 0,19$	$3,63 \pm 0,10$	$2,98 \pm 0,08$
Хлорофилл b, мг/г	$2,17 \pm 0,06$	$1,11 \pm 0,03$	$1,56 \pm 0,04$
Каротиноиды, %	$3,05 \pm 0,09$	$4,25 \pm 0,12$	$3,17 \pm 0,09$
Влажность, %	$6,61 \pm 0,19$	$8,96 \pm 0,26$	$8,59 \pm 0,25$

Анализ результатов, представленных в таблице 2, показывает, что микроводоросли *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Pleurochrysis carterae*, выделенные из акватории Балтийского моря (Калининградская область), характеризуются разнообразным составом, что и обуславливает интерес к ним как к объектам исследования и перспективного сырья для получения ценных биологических продуктов. В процессе изучения химического состава микроводорослей подтверждено, что исследуемые культуры способны образовывать органические соединения, необходимые для нормальной жизнедеятельности живого организма. Среди основных веществ, обнаруженных при реализации научно-исследовательской работы, — протеины, липиды, углеводы, в том числе пищевые волокна, пигменты (хлорофиллы и каротиноиды). Также было определено содержание влаги в биомассе культур *Chlorella vulgaris*, *Arthrospira platensis*, *Pleurochrysis carterae*.



Микроводоросли *Pleurochrysis carterae*, *Arthrospira platensis* и *Chlorella vulgaris* синтезируют углеводы в количестве $11,53 \pm 0,34$, $11,44 \pm 0,34$ и $11,22 \pm 0,33$ % соответственно.

Установлено, что исследуемые образцы микроводорослей имеют низкое значение показателя «Содержание золы», который составляет $7,38 \pm 0,22$ % для микроводорослей *Pleurochrysis carterae*. При этом количество золы в культуре клеток микроводорослей *Arthrospira platensis* достигает $7,13 \pm 0,21$ %, а в биомассе микроводорослей *Chlorella vulgaris* – $6,54 \pm 0,19$ %.

Микроводоросли *Arthrospira platensis* и *Chlorella vulgaris* отличаются от культур клеток *Pleurochrysis carterae* тем, что содержат большое количество белка. Показано, что при культивировании культуры клеток *Arthrospira platensis* синтезируется до $60,03 \pm 1,80$ % белка от сухого веса, при наработке биомассы микроводорослей *Chlorella vulgaris* количество образованного белка составляет $56,20 \pm 1,68$ %, в то время как микроводоросли *Pleurochrysis carterae* содержат всего $43,32 \pm 1,29$ % белка.

Наибольшее содержание липидов отмечено в культуре микроводорослей *Pleurochrysis carterae* и *Chlorella vulgaris*: $19,61 \pm 0,58$ и $16,24 \pm 0,48$ % соответственно. Содержание жиров у культуры клеток микроводорослей *Arthrospira platensis* достигает $7,23 \pm 0,21$ %.

Количественное содержание растительных волокон у всех исследуемых образцов практически одинаково. Массовая доля пищевых волокон в образцах микроводорослей *Arthrospira platensis* составляет $3,58 \pm 0,10$ %, незначительно меньше отмечено содержание пищевых волокон в клетках микроводорослей *Chlorella vulgaris* ($3,52 \pm 0,10$ %) и *Pleurochrysis carterae* ($3,46 \pm 0,10$ %).

Выводы

Таким образом, в работе изучены физико-химические свойства микроводорослей Балтийского моря в Калининградской области: активная кислотность, оптическая плотность суспензии, плотность суспензии, динамическая вязкость, содержание сухих веществ, цвет и запах суспензии. Максимальное значение оптической плотности (OD 750) отмечено у микроводорослей *Chlorella vulgaris*. Плотность суспензии для микроводорослей *Arthrospira platensis* после 7 суток культивирования составила $925,28 \pm 27,75$ кг/м³, что значительно больше, чем плотность суспензии микроводорослей *Chlorella vulgaris* (плотность суспензии – $812,26 \pm 24,36$ кг/м³), но меньше, чем значение исследуемого показателя у суспензии микроводоросли *Pleurochrysis carterae*. Высокая динамическая вязкость среди исследуемых образцов обнаружена у суспензий микроводорослей *Pleurochrysis carterae* – $(1,04 \pm 0,03) \cdot 10^{-3}$ Па·с. Суспензия микроводорослей *Arthrospira platensis* характеризовалась значением динамической вязкости $(0,94 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$ Па·с. Значение активной кислотности суспензии у всех исследуемых образцов различно, но установлено, что все микроводоросли растут и активно развиваются в щелочной среде. Показано, что при культивировании клеток *Arthrospira platensis* синтезируется белка до $60,03 \pm 1,80$ % от сухого веса, при культивировании клеток биомассы микроводорослей *Chlorella vulgaris* количество образованного белка составляет $56,20 \pm 1,68$ %.



Список литературы

1. Rizwan M., Mujtaba G., Memon S. A. et al. Exploring the potential of microalgae for new biotechnology applications and beyond: a review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 92. P. 394–404.
2. Villarruel-Lopez A., Ascencio F., Nuno K. Microalgae, a Potential Natural Functional Food Source – a Review // Polish journal of food and nutrition sciences. 2017. Vol. 67 (4). P. 251–263.
3. Barka A., Blecker C. Microalgae as a potential source of singlecell proteins // Biotechnology, Agronomy, Society and Environment. 2016. Vol. 20. P. 427–436.
4. Sprague M., Betancor M. B., Tocher D. R. Microbial and genetically engineered oils as replacements for fish oil in aquaculture feeds // Biotechnology Letters. 2017. Vol. 39 (11). P. 1599–1609.
5. Ferreira G. F., Rios Pinto L. F., Maciel Filho R. et al. A review on lipid production from microalgae: Association between cultivation using waste streams and fatty acid profiles // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 109. P. 448–466.
6. Scharff C., Domurath N., Wensch-Dorendorf M. et al. Effect of different photoperiods on the biochemical profile of the green algae *C. vulgaris* and *S. obliquus* // Acta Horticulturae. 2017. P. 1149–1156.
7. Sarat Chandra T., Aditi S., Maneesh Kumar M. et al. Growth and biochemical characteristics of an indigenous freshwater microalga, *Scenedesmus obtusus*, cultivated in an airlift photobioreactor: effect of reactor hydrodynamics, light intensity, and photoperiod // Bioprocess and Biosystems Engineering. 2017. Vol. 40. P. 1057–1068.
8. Santiago-Morales I. S., Trujillo-Valle L., Márquez-Rocha F. J. et al. Tocopherols, phycocyanin and superoxide dismutase from microalgae as potential food antioxidants // Applied Food Biotechnology. 2018. Vol. 5 (1). P. 19–27.
9. Hu J., Nagarajan D., Zhang Q. et al. Heterotrophic Cultivation of Microalgae for Pigment Production: A Review // Biotechnol. Adv. 2018. Vol. 36. P. 54–67.
10. Mazumdar N., Novis P. M., Visnovsky G. et al. Effect of nutrients on the growth of a new alpine strain of *Haematococcus* (Chlorophyceae) from New Zealand // Phycol. Res. 2019. Vol. 67 (1). P. 21–27.
11. Zhan J., Rong J., Wang Q. Mixotrophic cultivation, a preferable microalgae cultivation mode for biomass/bioenergy production, and bioremediation, advances and prospect // Int. J. Hydrogen Energy. 2017. Vol. 42 (12). P. 8505–8517.
12. Mantzorou A., Ververidis F. Microalgal biofilms: A further step over current microalgal cultivation techniques // Sci. Total Environ. 2019. Vol. 651 (2). P. 3187–3201.
13. Nguyen H. C., Su C.-H., Yu Y.-K. et al. Sugarcane bagasse as a novel carbon source for heterotrophic cultivation of oleaginous microalga *Schizochytrium* sp. // Ind Crops Prod. 2018. Vol. 121. P. 99–105.
14. Cassini S. T., Francisco S. A., Antunes P. W. P. et al. Harvesting Microalgal Biomass grown in Anaerobic Sewage Treatment Effluent by the Coagulation-Flocculation Method: Effect of pH // Braz. Arch. Biol. Technol. 2017. Vol. 60. Art. №e160174.
15. Rincon S. M., Urrego N. F., Avila K. J. Photosynthetic activity assessment in mixotrophically cultured *Chlorella vulgaris* biofilms at various developmental stages // Algal Research. 2019. Vol. 38. Art. №101408.
16. De Freitas Coêlho D., Lacerdola Tundisi L., Santos Cerqueira K. et al. Microalgae: Cultivation Aspects and Bioactive Compounds // Brazilian Archives of Biology and Technology. 2019. Vol. 62. Art. №e19180343.



17. *Iasimone F., Panico A., Felice V. et al.* Effect of light intensity and nutrient supply on microalgae cultivated in urban wastewater: Biomass production, lipids accumulation and settleability characteristics // *Journal of Environmental Management*. 2018. Vol. 223. P. 1078–1085.

18. *Corrêa D. O., Santos B., Dias F. G. et al.* Enhanced biohydrogen production from microalgae by diesel engine hazardous emissions fixation // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. P. 21463–21475.

19. *Da Fontoura J. T., Rolim G. S., Farenzena M. et al.* Influence of light intensity and tannery wastewater concentration on biomass production and nutrient removal by microalgae *Scenedesmus sp.* // *Process Safety and Environmental Protection*. 2017. Vol. 111. P. 355–362.

20. *Durán I., Rubiera F., Pevida C.* Microalgae: Potential precursors of CO₂ adsorbents // *Journal of CO₂ Utilization*. 2018. Vol. 26. P. 454–464.

Об авторах

Егор Владимирович Каширских – канд. техн. наук, Кемеровский государственный университет, Россия.

E-mail: eelen.ulrich@mail.ru

Людмила Константиновна Асякина – канд. техн. наук, доц., Кемеровский государственный университет», Россия.

E-mail: alk_kem@mail.ru

Данил Денисович Надцонов – студ., Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Россия.

E-mail: m2104945@edu.misis.ru

The authors

Dr Egor V. Kashirskikh, Kemerovo State University, Russia.

E-mail: eelen.ulrich@mail.ru

Dr Lyudmila K. Asyakina, Kemerovo State University, Russia.

E-mail: alk_kem@mail.ru

Danil D. Nadtsonov, National Research Technological University “MISIS”, Russia.

E-mail: m2104945@edu.misis.ru