

Обзорная статья / Review article

УДК 573.6; 581.6; 579.695

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-358-371>



Фототрофы в альтернативной энергетике

© М.С. Коновалов*, Е.Ю. Коновалова*, И.Н. Егорова**,
Г.О. Жданова*, Д.И. Стом*,****

*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

**Сибирский институт физиологии и биохимии растений, г. Иркутск, Российская Федерация

***Байкальский музей ИНЦ, п. Листвянка, Российская Федерация

Резюме: В представленном обзоре рассматривается роль фототрофов в альтернативной энергетике, при этом основной упор сделан на одноклеточные водоросли. Особое внимание уделено применению фототрофов для генерации электроэнергии с использованием биотопливных элементов (обсуждаются растительные и ферментные биотопливные элементы). Главное место отведено микробным топливным элементам (МТЭ), которые наряду с электроэнергией позволяют получать биотопливо и биоводород. Рассматриваются факторы, ограничивающие мощность МТЭ, а также пути их преодоления. Так, например, для снижения убыли мощности МТЭ из-за перенапряжения представляется перспективной разработка различных фотобиореакторов. Использование микрофототрофов в МТЭ привело к разработке фотосинтетических МТЭ (или ФотоМТЭ) посредством конструирования автотрофных фотобиореакторов с принудительным освещением. Они дают возможность генерировать кислород за счет фотосинтеза как *in situ*, так и *ex situ*, рециркулируя кислород из фотобиореактора в катодную камеру. Здесь могут быть использованы искусственные редокс-медиаторы, переносящие электроны непосредственно с некаталитического катода на O_2 , образующийся в результате фотосинтезирующей активности водорослей. Показано, что биологически катализируемые катоды генерируют меньшую мощность по сравнению с химическими катализаторами. Отмечено, что установки МТЭ с микроводородными позволяют утилизировать широкий круг различных соединений – компонентов сточных вод и отходов: органические кислоты, сахара, спирты, жиры и другие субстраты. Особый раздел представляет использование фототрофов для производства биотоплива. Из микроводорослей можно получить несколько различных видов возобновляемого биотоплива, производство которого может быть объединено с очисткой сточных вод, улавливанием CO_2 , производством различных соединений.

Ключевые слова: фототрофы, микроводоросли, биоводород, биотопливные элементы, биотехнология, генерирование электрического тока

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-18-50330 «Фототрофы в альтернативной энергетике».

Для цитирования: Коновалов М.С., Коновалова Е.Ю., Егорова И.Н., Жданова Г.О., Стом Д.И. Фототрофы в альтернативной энергетике. *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2021. Т. 11. N 3. С. 358–371. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-358-371>

Phototrophs in alternative energy

Mikhail S. Konovalov*, Elena Yu. Konovalova*, Irina N. Egorova**,
Galina O. Zhdanova*, Devard I. Stom*,****

* Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

** Siberian Institute of Plant Physiology and Biochemistry, Irkutsk, Russian Federation

*** Baikal Museum ISC, Listvyanka, Russian Federation

Abstract: The role of phototrophs is examined in alternative energy, with the main emphasis on unicellular algae. Particular attention is paid to the use of phototrophs for generating electricity using biofuel cells (plant and enzymatic biofuel cells are discussed). This study focuses on microbial fuel cells (MFC), which, along with electric power, allow obtaining biofuels and biohydrogen. This article explains the factors limiting the MFC power, and ways of overcoming them. For example, it seems promising to develop various photobioreactors in order to reduce the loss of MFC power due to overvoltage. The use of microphototrophs in MFC has led to the development of photosynthetic MFC (or PhotoMFC) through the design of autotrophic photobioreactors with forced illumination. They allow generating oxygen through photosynthesis, both *in situ* and *ex situ*, by recirculating oxygen from the photobioreactor to the cathode chamber. Artificial redox mediators

can be used here, transferring electrons directly from the non-catalytic cathode to O_2 , formed as a result of the photosynthetic activity of algae. Biologically catalyzed cathodes have been proven to generate less power than chemical catalysts. It is noted, that the MFC installations with the micro-algae allow utilizing a wider circle of different connections – the components of effluents and withdrawals: organic acids, sugar, alcohols, fats and other substrata. The use of phototrophs for the production of biofuels is of special interest. Several different types of renewable biofuels can be produced from microalgae, the production of which can be combined with wastewater treatment, CO_2 capture and production of various compounds.

Keywords: phototrophs, microalgae, biohydrogen, biofuel cells, biotechnology, electric current generation

Acknowledgement: The work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-18-50330 “Phototrophs in alternative energetics”).

For citation: Konovalov MS, Konovalova EYu, Egorova IN, Zhdanova GO, Stom DI. Phototrophs in alternative energy. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(3):358–371. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-3-358-371>

ВВЕДЕНИЕ

Человечество сегодня сталкивается со многими экологическими проблемами: загрязнение окружающей среды; глобальное потепление из-за накопления CO_2 в атмосфере; истощение природных источников энергии, таких как уголь и нефть, и растущая потребность в устойчивых источниках энергии. В последние годы особое внимание уделяется исследованиям в области возобновляемых источников энергии, в частности, биоэнергетики. Исследуются пути получения различных типов биотоплива (биодизель, биоводород), а также производство энергии организмами в специальных установках. Одним из перспективных источников энергии являются фототрофные организмы.

Микроводоросли – один из самых эффективных источников возобновляемой энергии. В них содержится до 50–70% белка, 30% липидов, более 40% глицерина, до 14% каротина и довольно высокая концентрация витаминов В1, В2, В3, В6, В12, Е, К, D и т. д. в сравнении с другими растениями или животными [1, 2]. В то же время водоросли способны усваивать атмосферный углекислый газ, что косвенно может привести к ослаблению проблемы глобального потепления. Микроводоросли являются важным сырьем для получения аминокислот, витаминов и ценных побочных продуктов. Содержание липидов в них находится в диапазоне 20–50%, что выше, чем у других культур. Из таких липидов производят биодизельное топливо, которое легко разлагается [3]. Микроводоросли способны расти с большой скоростью, достигающей показателей в 50 раз больше, чем у проса, которое является одной из самых быстрорастущих наземных культур. Также у них более высокая эффективность преобразования фотонов, что составляет примерно 3–8% против 0,5% для наземных растений. Микроводоросли являются отличным альтернативным топливным сырьем. В качестве среды для их культивирования возможно использовать сточные воды. Затраты на выращивание водорослей и их сбор для производства

биотоплива в таком случае покрываются функцией очистки сточных вод [4]. Как альтернативный, надежный и возобновляемый источник энергии важен биоводород, производимый микроводорослями, включая цианобактерии. Фотосинтетическое производство водорода может быть интересным и многообещающим вариантом получения чистой энергии. Достижения в технологии водородных топливных элементов свидетельствуют об экологически безопасном способе производства биотоплива, поскольку при использовании водорода для выработки электроэнергии в качестве побочного продукта выделяется только вода. Прогресс в генетической / метаболической инженерии значительно увеличивает фотобиологическое производство водорода из микроводорослей. Более того, биологическое производство водорода возможно при низких эксплуатационных расходах. Для крупномасштабного производства биомассы микроводорослей и водорода было разработано несколько фотобиореакторов [5]. Целью настоящего обзора является обобщение сведений об использовании фототрофов в альтернативной энергетике.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОТРОФОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

В области альтернативной энергетики проводятся исследования, направленные на использование способности микроводорослей превращать поглощенный CO_2 в потенциальную биомассу наряду с выработкой газообразного кислорода и интегрировать их в биотопливные элементы. Это устройства, в которых осуществляется превращение химической энергии различных веществ-субстратов (спиртов, углеводов и т.д.) в электрическую энергию за счет биологической трансформации.

Разработано множество видов биотопливных элементов – растительные, ферментные, микробные. Микробный топливный элемент (МТЭ) – это биологическая система, в которой отрыв электронов и их акцептирование пространственно

разделены. Соответственно МТЭ чаще всего имеет два блока: аэробный и анаэробный. Аэробная камера имеет положительно заряженный электрод и барботируется кислородом. В анаэробной камере нет кислорода, что позволяет отрицательно заряженному электроду действовать как рецептор электронов. В качестве субстрата или источника углерода в МТЭ используют сточную воду, различные углеводы (глюкоза, сахароза, крахмал), ацетат, аминокислоты, ароматические соединения (бензоат, толуол), масла, спирты, растворы минеральных солей и др. Схема работы классического варианта МТЭ приведена на рисунке.

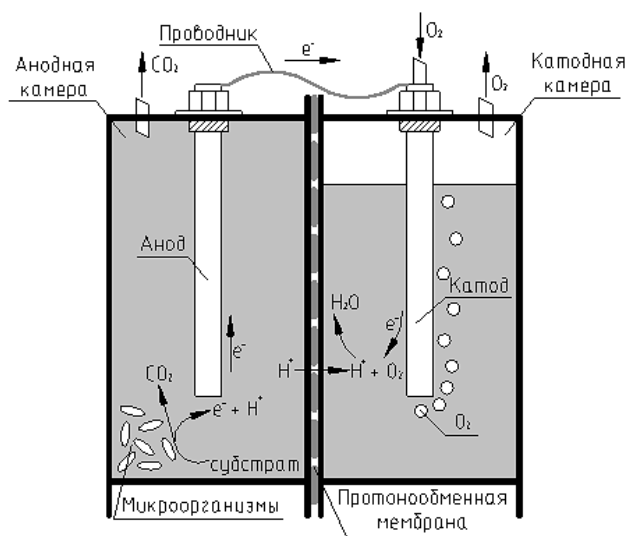


Схема работы микробного топливного элемента
Microbial fuel cell operation diagram

Мощность МТЭ зависит от многих факторов и ограничена, прежде всего, высоким внутренним (омическим) сопротивлением. Увеличения мощности можно достичь за счет добавления катализаторов. Этой же цели служит подбор оптимального расстояния между электродами, а также применение электродов из различных материалов. В работе Н. Liu показано, что при ионной силе раствора, равной 400 мМ, удельная мощность достигает величины 1330 мВт/м². В ячейках авторы использовали электроды из углеродного волокна с добавлением платины. Оптимальное расстояние между такими электродами составило 2 см [6]. Размер электродов также влияет на уровень производимой электроэнергии [7]. Улучшения в архитектуре МТЭ, вероятно, могут привести к увеличению выработки электроэнергии. Микроорганизмы, используемые в МТЭ, демонстрируют большое разнообразие. Т.Н. Pham с соавторами определяют такие микроорганизмы как «экзоэлектрогены» [8].

Использование микрофототрофов в МТЭ привело к разработке фотосинтетических микробных топливных элементов или ФотоМТЭ [9].

Основным недостатком применения микрофототрофов является необходимость создания автотрофных фотобиореакторов с принудительным освещением [5]. Гетеротрофный режим роста помогает устранить этот недостаток. Отметим, что некоторые водоросли в гетеротрофном режиме имеют более высокие темпы роста, биомассу, выработку АТФ, содержание азота и липидов, чем в автотрофном режиме. Однако только ограниченное число видов водорослей, используемых в биотехнологии, способны к гетеротрофному росту. Кроме того, энергетические затраты увеличиваются за счет дополнения органического субстрата, тем самым увеличивая шансы на ингибирование роста избыточным органическим субстратом и неспособностью производить метаболиты. Гетеротрофный режим культивирования более подвержен загрязнению и конкуренции со стороны других микроорганизмов.

D.F. Juang с соавторами в своем исследовании показали, что электрическая энергия может вырабатываться водорослями, растущими на катоде в МТЭ, где кислород продуцируется в процессе фотосинтеза [10]. Их идея нашла применение в МТЭ с использованием водорослевого биокатода, который действует как биологический акцептор электронов, одновременно поглощая CO₂ [11, 12]. Авторы сконструировали двухкамерный МТЭ. В катодную и анодную камеры инокулировали зеленую водоросль *Chlorella vulgaris*. В катодной камере водоросли выступали в основном как продуценты кислорода. Авторами показано, что микроводоросли в катодной камере в световую фазу поглощали CO₂, наращивая биомассу, а в темновую фазу потребляли кислород, получая энергию путем окисления ранее произведенного органического вещества. Выявлено, что производство электроэнергии не было постоянным, а зависело от концентрации кислорода и продолжительности освещения [11]. И наоборот, некоторые фотосинтетические цианобактерии могут работать как биоанодный катализатор, образование биопленки в котором поддерживает электрохимический потенциал. Так, например, в работе С.-С. Fu с соавторами упоминается, что *Spirulina platensis* может быть использована в качестве биоанодного катализатора. Она не нуждается в привнесенных в среду медиаторах для акцептирования генерируемого электрона [13].

В рассматриваемых исследованиях использовались в основном фотосинтезирующие виды цианобактерий, такие как представители рода *Anabaena* [14]. Виды *Synechocystis* и некоторые другие микроводоросли использовались в МТЭ с открытыми биореакторами [15]. Фотосинтезирующие водоросли *Chlorella* использовались с гетеротрофными бактериями в синергетической реакции при производстве электроэнергии [16]. Микроводоросли также были исследованы в ка-

честве биокатализатора для выработки энергии в микробных топливных элементах с такими медиаторами, как HNQ (гидроксид 1,4-нафтохинон) в качестве искусственного окислительно-восстановительного медиатора, перемещающего электрон от микроорганизма к аноду [17]. Точно так же выработка энергии была достигнута путем выращивания дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* для окисления глюкозы и микроводорослей *Spirulina platensis* и *Chlorella vulgaris* для генерации электронов в МТЭ [18]. В большинстве упомянутых исследований наблюдалось увеличение выработки электроэнергии в темное время суток. Однако производство водородными кислородами ограничивало выработку ими энергии во время светлых фаз.

В последнее время развивается технология фотосинтетического водородослевого микробного топливного элемента, инокулятом в котором выступают микроводоросли и электрохимически активные бактерии в открытой системе без добавления токсичных медиаторов, что является важным шагом [19]. Произведенная в биореакторе биомасса микроводорослей, образованная в результате фотосинтетического роста, может подаваться в МТЭ в качестве субстрата для выработки электроэнергии. Водоросли использовались в качестве анолита в МТЭ для производства электронов. Разработанные ФотоМТЭ требуют отдельного фотобиореактора для оптимального роста водорослей и менее сложной системы затемненного МТЭ, производящей электроэнергию. Однако существуют ограничения на утилизацию сложного органического вещества смешанным гетеротрофным бактериальным сообществом в МТЭ из-за низкой кулоновской эффективности. Поэтому разработка фотобиореактора с иммобилизованными цианобактериями для последовательного генерирования и разложения продуктов метаболизма с темным МТЭ для повышения кулоновской эффективности выглядит перспективной. Так, М. Otadi с соавторами продемонстрировали перспективность ФотоМТЭ для выработки электроэнергии [20]. S.B. Velasquez-Orta с соавторами разработали МТЭ, соединенный с фотобиореактором. Такой МТЭ показал производство постоянного тока на выходе 539 mA/m^2 за все время работы, равное 150 дням [21].

Производительность фотосинтетического МТЭ с использованием микро- и макроводорослей, таких как *Chlorella vulgaris* и *Ulva lactuca*, была оценена S. Mahesh с соавторами. Получена разница в рекуперации энергии на аноде МТЭ. *Ch. vulgaris* производит больше энергии с удельной мощностью (277 Вт/м^3), чем *U. lactuca* (215 Вт/м^3) [22]. Некоторые исследователи приложили значительные усилия для улучшения характеристик катодной системы путем увеличения уровня производства кислорода цианобакте-

риями, иммобилизованными в виде шариков [23] или без иммобилизации [10], а также прямого выращивания *Chlorella* на катоде [11, 12].

Возможность генерировать кислород посредством фотосинтеза как *in situ*, так и *ex situ*, рециркулируя раствор из фотобиореактора в катодную камеру ФотоМТЭ, показали В.Е. Logan с соавторами [24]. Целью этого являлось обеспечение терминального акцептора электронов кислородом без азрации. Эта концепция была выдвинута еще на очень ранней стадии развития биоэлектрохимических систем (БЭС). В ходе исследования ФотоМТЭ обеспечивался кислородом, продуцируемым водорослями, инокулированными в катодную камеру. В более поздних исследованиях водоросль *Chlorella vulgaris* выращивали на катоде и добавляли искусственный медиатор. Авторы работы [25] считают, что кислород играет очень важную роль в процессе переноса электронов. Используемый искусственный редокс-медиатор мог переносить электроны непосредственно с некаталитического катода на O_2 , образующийся в результате фотосинтезирующей активности водорослей. В другом исследовании *in situ* генерация O_2 в ФотоМТЭ с использованием смешанной культуры водорослей и бактерий была использована для реверса анода и катода в темновой и световой фазах соответственно. Вероятно, было бы целесообразно иметь небольшое количество O_2 в аноде, так как это обеспечило бы выгодные энергетические профили в микроаэробных условиях. Кроме того, как упоминалось ранее, фотосинтетический кислород, генерируемый бактериями на катоде поверх анаэробного осадка в течение световой фазы, может быть полезным в отношении текущей генерации в ФотоМТЭ осадочного типа [19]. Н.-М. Jiang с соавторами разработали безмембранный МТЭ. В предложенной ими конфигурации МТЭ соединялся с фотобиореактором, в котором культивировали микроводоросли. Перспективность установки состоит в том, что она может быть использована как для очистки сточных вод, так и для выработки электрической энергии и одновременной культивации микроводорослей. В МТЭ в сточных водах снижается ХПК, содержание фосфора и азота с одновременным производством электроэнергии. Затем сточные воды, выходящие из катодной камеры, поступают в фотобиореактор для уменьшения остатков фосфора и азота за счет их поглощения микроводорослями. Максимальная плотность мощности, полученная в этом случае, составила 481 МВт/м^2 , а удаления ХПК – 78%. Конфигурация с мембраной была способна производить электроэнергию с максимальной плотностью мощности 110 МВт/м^2 [26].

S. Pandit с соавторами в своей работе продемонстрировали снижение мощности МТЭ при использовании биологических катализаторов в

катодной камере против химических. В целом биологически катализируемые катоды генерируют меньшую мощность по сравнению с химическими катализаторами. Еще одной проблемой двухкамерных МТЭ, выявленной авторами, является защелачивание катодной камеры после длительной работы, в результате чего рабочее напряжение падает. Авторами высказана идея, что при должном регулировании подачи CO_2 , освещения и поступления питательных веществ к микроводорослям возможно повысить эффективность МТЭ [27]. Водоросли несут отрицательный заряд на своей поверхности и, следовательно, являются потенциальным адсорбентом поливалентных катионов, присутствующих в среде. Адсорбция поливалентных катионов на поверхности водорослей вызывает морфологические изменения или может заменить (заблокировать) простетические атомы металлов в активных центрах соответствующих ферментов, приводя, в частности, к ингибированию фотосинтеза. Интенсивность света на глубине плотной взвеси водорослей значительно снижается из-за поглощения и рассеяния света. Ослабление интенсивности света зависит от длины его волны, глубины проникновения, от концентрации клеток и геометрии фотокатода [28].

В последние годы исследователи обращают внимание на фиксацию CO_2 с помощью фотосинтеза в сочетании с гетеротрофным производством электроэнергии. В соленых и пресноводных отложениях про- и эукариотические водоросли и некоторые бактерии, такие как цианобактерии, способны поставлять органическое вещество (например, выделяемые полисахариды) гетеротрофным бактериям посредством фотосинтеза. Подобным образом поддерживаются синергетические сообщества в таких экосистемах, как микробные маты [29]. Известно множество разработок, включающих ФотоМТЭ либо микробные фотоэлектрические солнечные элементы, либо фотосинтетические микробные топливные элементы, либо фотосинтетическую электрохимическую ячейку и др. [30]. Предполагается, что в МТЭ с использованием солнечного излучения вырабатывается больше электроэнергии, чем без него. Среди фоточувствительных материалов одним из первых в фотокатодных МТЭ был использован диоксид титана (TiO_2 , рутил). Свойство диоксида титана поглощать УФ-свет широко используется в солнцезащитных продуктах. При использовании в МТЭ графитового электрода, покрытого диоксидом титана, мощность элемента увеличилась в 1,57 раза, а выработка достигла $12,03 \text{ Вт/м}^3$ [31]. В двухкамерном МТЭ с водорослевым фотокатодом и мембраной Nafion электрическая мощность ($0,108 \text{ мВт/см}^2$) была относительно близкой к мощности, генерируемой Pt/C-электродом в тем-

ноте ($0,123 \text{ мВт/см}^2$) [32]. То, что можно производить более высокую электрическую мощность, было также показано при использовании ФотоМТЭ для очистки сточных вод с комбинацией анодов из TiO_2 , которая обеспечивала $1284 \pm 20 \text{ мВт/м}^2$ [33].

Авторами работы [34] в ФотоМТЭ осадочного типа (пресноводный осадок) был исследован синергетический комплекс водорослей и бактерий для выработки электроэнергии. ФотоМТЭ при содержании микробного сообщества под освещением вырабатывал ток непрерывно. Подобно ранним исследованиям, выработка электроэнергии в этом случае также показала обратную связь с освещением: величина тока увеличивалась при отсутствии света и уменьшалась при его наличии. Авторами показано, что производство тока уменьшается при непрерывном освещении вследствие накопления кислорода. Исследования также проводились с использованием в ФотоМТЭ осадочного типа морской микробиоты, микробного анода и катода [34]. Фотосинтезирующие микроорганизмы в таком МТЭ вырабатывают O_2 для восстановления катодом и органическое вещество, которое используется в качестве источника углерода в аноде в анаэробном осадке. За счет этого образуется самоподдерживающаяся синергетическая биоэлектрохимическая система, потребляющая свет и производящая электричество. В данном исследовании наблюдалась светозависимая генерация тока, поскольку система зависела от производства O_2 .

Так как кислород является универсальным акцептором электронов, в процессе фотосинтеза водорослей он может поглощать электроны во время метаболизма, тем самым снижая эффективность МТЭ [35]. J. Lobato с соавторами использовали фотосинтез водорослей в качестве источника кислорода в катодной камере двухкамерного ФотоМТЭ [36]. В исследовании M.A. Rodrigo с соавторами МТЭ состоял из двух камер, разделенных ионообменной мембраной. Инокулятом для анодного отсека выступал активный ил станции очистки сточных вод. Анодный отсек во время работы укрывался светонепроницаемым материалом, чтобы исключить свет и тем самым избежать роста водорослей [37]. В то же время катодный отсек содержал культуру микроводорослей, которая освещалась в течение 12 ч. Анодофильные бактерии производили CO_2 , который переносился в катодный отсек и мог быть использован микроводорослями в процессе фотосинтеза для производства биомассы. Перенос осуществлялся через вентиляционное отверстие в верхней части каждой камеры, соединенное трубкой с воронкообразным газосборником, расположенным со стороны анода для упрощения передачи газа в катодную камеру [38].

В МТЭ используются представители различных родов водорослей – *Chlorella*, *Synechocystis*,

Microcystis и др. Так, например, в исследовании K.S. Aiyer с соавторами в катодной камере присутствовала зеленая водоросль *Chlorella vulgaris*, в анодной – гетеротрофные бактерии *Escherichia coli* и *Pseudomonas aeruginosa*. При этом удалось достичь удельной мощности 248 мВт/м^2 , тогда как МТЭ только с культурами *E. coli* и *P. aeruginosa* выработал $190,44 \text{ мВт/м}^2$ [16]. Фотосинтетическая биопленка, состоящая из зеленых водорослей и гетеротрофных бактерий, также использовалась в МТЭ для производства энергии [39]. Y. Zou с соавторами использовали в МТЭ биопленку, полученную путем культивирования водорослей из донных осадков пресноводного водоема. Для сравнения использовали ячейку, в анодную камеру которой поместили биопленку из чистой культуры пресноводной цианобактерии *Synechocystis*. Первый МТЭ достиг максимума в производстве электроэнергии (до $1,5 \text{ мВт/м}^2$) через 20–30 мин после начала освещения биопленки. При этом МТЭ с чистой культурой *Synechocystis* достиг меньшего показателя мощности – $1,47 \text{ мВт/м}^2$. В своем исследовании авторы сконструировали однокамерный МТЭ. Анодная камера представляла собой сосуд с нанесенными на дно четыремя слоями углеродной краски или одним слоем углеродной ткани. Катод состоял из углеродной ткани с платиновым катализатором и располагался над анодной камерой [40]. По мнению I. Gajda с соавторами, фотосинтезирующие микроорганизмы работают аналогичным образом, как и бактерии во время генерации электроэнергии в МТЭ, отдавая электроны на электрод. В разработанном двухкамерном МТЭ учеными вместо барботажа, медиаторов, буферов, питательной среды и платинового катализатора были использованы биокаталитические свойства естественных фотосинтетических консорциумов, что сводило эксплуатационные расходы к минимуму. Инокулятом для катодной камеры и источником образования фототрофной биопленки служила предварительно подготовленная вода из пресноводного водоема. Культивация культуры водорослей проводилась не в отдельном биореакторе, а непосредственно в катодной камере МТЭ. В анодную камеру инокулировали анаэробный активный ил. Материал электродов – углеродная ткань. Максимальный результат, которого удалось достичь, – 7 мВт/м^2 . Авторы предполагают, что биокатод также действовал как сборщик фотосинтетического углекислого газа, поскольку во время темной фазы генерация электроэнергии подавляется и дыхание происходит за счет активности фотосинтезирующих организмов и гетеротрофных бактерий [41]. Известна работа, в которой авторы сосредоточились на модификации анода в ФотоМТЭ [42]. Ячейки состояли из цилиндрической камеры, в которую помещали анод из керамики с покрытием оксидом олова, легированного

фтором, стекла с покрытием оксидом олова, углеродной ткани или углеродного войлока. Биопленка *Chlorella vulgaris* культивировалась непосредственно в порах керамического электрода. Сравнение МТЭ с различными типами электродов показало, что удельная мощность на керамическом аноде была в 16 раз выше, чем на аноде из углеродного волокна, составив в максимуме $3,4 \text{ мВт/см}^2$

R. Lakshmidēvi с соавторами провели исследование возможности производства электроэнергии и биологически активных соединений в МТЭ. В качестве инокулята в анодной камере использовали бактериальный штамм *Enterobacter aerogenes*. Субстратом в аноде выступали сточные воды от молочного производства. В катодную камеру инокулировали цианобактерию *Nostoc sp.* в объеме 5% от общего объема синтетической среды. Электродами выступали углеродные пластины. Анодную камеру обернули алюминиевой фольгой для защиты от проникновения света и создания условий для брожения в темноте. Отвод углекислого газа от процесса брожения в катодную камеру осуществили с помощью силиконовой трубки. Максимальный результат МТЭ по выработке энергии составил $168 \pm 3,5 \text{ мВт/м}^2$. При этом продуктивность ячейки в образовании биомассы *Nostoc sp.* была в пределах 95 мг/л в сутки. Из биомассы водорослей получали экстракт, который проверяли на антимикробные свойства. Выявлено, что экстракт подавляет развитие патогенных бактерий *Escherichia coli*, *Streptococcus iniae*, *Citrobacter freundii*, *Vibrio alginolyticus*. Наибольший антимикробный эффект наблюдался в культуре *Citrobacter freundii* [43].

Сульфат натрия – самая распространенная соль сульфата, оказывающая благоприятное действие на содержание хлорофилла в пресноводных микроводорослях, кинетику их роста, плотность клеток, тем самым активно поддерживая некоторые биологические процессы. Однако высокие концентрации (более 1 г/л) сульфата натрия будут оказывать неблагоприятное воздействие не только на рост водорослей, но и на процесс фотосинтеза за счет снижения уровня хлорофилла в клетках. Так, было показано, что при внесении в анолит МТЭ сульфата натрия происходит снижение концентрации кислорода в анодной камере [21, 35, 44]. Согласно работе Z. Не с соавторами [45], существует мутуалистическая связь между микроводорослями и гетеротрофными бактериями. В процессе выработки электроэнергии, учитывая значительное расстояние между анодом и фотосинтезирующими организмами, бактерии могут производить электричество из органических соединений. Эти сложные микробные сообщества также могут препятствовать процессу выработки электроэнергии. Показано, что при увеличении интенсивности освещения фотосинтезирующих мик-

роорганизмов не происходит ожидаемого увеличения напряжения тока. A.G. del Campo с соавторами [11] создали топливный элемент из микроводорослей, используя *C. vulgaris* в катодной камере и сточные воды от производства фруктовых соков – в анодной камере. Генерацию энергии изучали в присутствии и в отсутствие света. В исследовании было показано, что высокая плотность энергии наблюдалась даже в отсутствие света. Факторами, которые могут изменять мощность ячейки МТЭ, могут быть электрическое сопротивление электролита и его проводимость [46].

Комбинация технологии МТЭ с фотобиореактором на основе водоросли рода *Chlorella* может снизить выбросы парниковых газов от очистных сооружений, улавливая CO_2 , выбрасываемый промышленными объектами, или непосредственно из атмосферы. Производство микроводорослей может улучшить восстановление ресурсов, содержащихся в сточных водах. Показана эффективность систем МТЭ–фотобиореактор с использованием как модельных, так и агропромышленных сточных вод в качестве субстрата. Система, оснащенная биокатодом микроводорослей, доказала свою способность эффективно очищать реальные сточные воды [47].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОТРОФОВ ДЛЯ ПРОДУЦИРОВАНИЯ БИОВОДОРОДА

Важным направлением исследований в области альтернативной энергетики является разработка способов получения биоводорода. Наиболее распространенные микроводоросли, способные производить в процессе своего метаболизма водород, – это *Scenedesmus*, *Chlamydomonas*, *Anabaena*, *Synechococcus*. Среди бактерий это представители родов *Rhodobacter*, *Rubrivivax*, *Rhodovulum*, а также многие другие. Азотфиксирующая цианобактерия *Anabaena cylindrica* одновременно производит водород и кислород в атмосфере аргона в течение нескольких часов. Производство водорода происходит при нормальных атмосферных условиях, но гораздо медленнее, чем азотфиксация. Производство водорода можно увеличить путем снижения содержания в среде азота. *Scenedesmus* производит водород при воздействии света после содержания в темноте в анаэробных условиях. Эта зеленая водоросль выполняет биофотоллиз с использованием гидрогеназы для восстановления воды до водорода [48, 49].

Общая идея использования генерирующих водород фотосинтетических бактерий наряду с загруженным катализатором анодом заключается в производстве биоводорода такими бактериями с последующим окислением водорода *in situ* на электрокаталитической поверхности анода [50]. В исследовании с участием зеленой водоросли *Chlamydomonas reinhardtii* было обнаружено, что удаление водорода *in situ* (поддерж-

ние парциального давления водорода очень низким) полезно для увеличения производства водорода. Установлено, что депривация водорода в среде с *C. reinhardtii* стимулирует получение водорода путем биофотоллиза на свету с использованием фотосинтетического пути [51]. В культуре водоросли *Chlorella*, где депривация серы не применима из-за богатого сульфатами субстрата, был оценен эффект дефицита фосфора. Депривация фосфора смогла установить анаэробный метаболизм с устойчивой фотопродукцией водорода [52]. Также были протестированы менее распространенные элементы, такие как магний. Клетки *Chlamydomonas reinhardtii*, лишенные магния, демонстрировали производство водорода в течение более длительного времени, чем те же клетки в случае лишения серы. Этот эффект может зависеть от меньшей значимости магния для клеточной активности по сравнению с серой [53].

Было замечено, что производство водорода может быть увеличено до 60% по сравнению с системами, основанными на монокультуре *Chlamydomonas reinhardtii*, за счет использования систем совместного культивирования с бактерией *Escherichia coli*. Питательные среды, богатые глюкозой, используются бактериями, производящими уксусную кислоту, которая может быть использована в метаболизме водорослей [54]. Синергетически различные фотобиологические и ферментативные микробные метаболизмы могут взаимодействовать, увеличивая выход водорода [55]. В работе S.A. Markov с соавторами для генерации водорода использовался фотобиореактор на основе полых волокон. На поверхность волокон помещали культуру цианобактерии *Anabaena variabilis*. Производительность такого фотобиореактора составила 57 мл H_2 в час на 1 л раствора [56].

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФОТОТРОФОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИОТОПЛИВА

Из микроводорослей можно получить несколько различных видов возобновляемого биотоплива. К ним относятся биодизель из липидов микроводорослей и фотобиологически произведенный биоводород. Производство такого биотоплива может быть объединено с очисткой сточных вод, улавливанием CO_2 , производством различных химикатов и выработкой электрической энергии [57]. В большинстве исследований для производства биодизеля используют зеленые микроводоросли. Вероятно, это связано не с более высоким содержанием липидов в зеленых водорослях, чем в других таксонах водорослей, а скорее с тем, что многие зеленые водоросли легко изолируются из различных мест обитания и растут быстрее, чем виды из других таксономических групп. В отличие от высших растений водоросли демонстрируют большие различия в

составе жирных кислот, что тоже влияет на выбор оптимального таксона [58]. Например, F. Ahmad с соавторами для производства биодизеля использовали смешанную культуру – *Chlorella vulgaris* и *Rhizoclonium hieroglyphicum* [59]. Эти водоросли были выбраны авторами по причине высокого содержания липидов. Некоторые основные представители фототрофных организмов, применяемые в производстве биотоплива, приведены в таблице.

Выращивание микроводорослей для последующей переработки в биотопливо осуществля-

ется в специализированных прудах, фотобиореакторах и ферментерах [64]. Выгода использования микроводорослей для производства биодизеля очевидна: после извлечения липидов биомассу водорослей можно применять в качестве органического удобрения, так как в ней высоко содержание калия и азота. В зависимости от вида микроводорослей из биомассы могут быть получены полиненасыщенные жирные кислоты, сахара, пигменты, каротиноиды, биологически активные соединения [65].

Некоторые представители фототрофов, используемые при получении биодизеля и биоводорода

Some representatives of phototrophs used in biodiesel and biohydrogen production

Организм	Субстрат	Вид топлива	Страна	Источник
<i>Chlorella protothecoides</i>	Среда, обогащенная железом	Биодизель	Португалия, Иран	[57, 60]
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Среда, обогащенная железом	Биодизель	Португалия	[57]
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	Среда с глюкозой, дрожжевым экстрактом и морской солью	Биодизель	Португалия	[57]
<i>Euglena gracilis</i>	Минеральная питательная среда	Биодизель	Португалия	[57]
<i>Chlorella vulgaris</i>	Сточные воды	Биодизель	Пакистан, Иран, Словакия	[59, 60, 61]
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Среда, обогащенная ацетатом	Биоводород	Россия, Алжир, Италия	[50, 51, 62]
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Среда, обогащенная ацетатом	Биоводород	Алжир	[62]
<i>Anabaena azollae</i>	Среда с нитрогеназой	Биоводород	Россия	[63]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все большее место в биотехнологических исследованиях занимают фототрофы, в частности, микроводоросли. Перспективы их использования достаточно широки в биотехнологическом плане (производство витаминов, биотоплива и многое др.). В то же время показана эффективность использования различных представителей микроводорослей для выработки электроэнергии непосредственно в МТЭ или же опосредованно при совмещении МТЭ и фотобиореактора. При этом установки МТЭ с микроводорослями позволяют утилизировать широкий круг различных соединений – компонентов сточных вод и отхо-

дов: органические кислоты, сахара, спирты, жиры и другие субстраты. Однако существуют и ограничения по применению микроводорослей в МТЭ: в процессе фотосинтеза микроводоросли производят значительное количество кислорода, что может снижать эффективность выработки электроэнергии или метаболитов, например, водорода. Исследования в области применения микроводорослей в МТЭ и фотобиореакторах необходимо продолжать, так как глобальные проблемы истощения невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов и загрязнения окружающей среды становятся все острее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skjånes K., Rebours C., Lindblad P. Potential for green microalgae to produce hydrogen, pharmaceuticals and other high value products in a combined process // *Critical Reviews in Biotechnology*. 2013. Vol. 33. Issue 2. P. 172–215. <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.681625>
2. Vershinin A. Biological functions of carotenoids-diversity and evolution // *Biofactors*. 1999. Vol. 10. Issue 2-3. P. 99–104. <https://doi.org/10.1002/biof.5520100203>
3. Chisti Y. Biodiesel from microalgae // *Biotechnology Advances*. 2007. Vol. 25. Issue 3. P. 294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
4. Ullah K., Ahmad M., Sharma V.K., Lu P., Harvey A., Zafar M., et al. Algal biomass as a global source of transport fuels: Overview and development perspectives // *Progress in Natural Science: Materials International*. 2014. Vol. 24. Issue 4. P. 329–339. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.06.008>
5. Olivieri G., Salatino P., Marzocchella A. Advances in photobioreactors for intensive microalgal production: Configurations, operating strategies and applications // *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2013. Vol. 89. Issue 2. P. 178–195. <https://doi.org/10.1002/jctb.4218>
6. Liu H., Cheng S., Logan B.E. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration // *Environmental Science & Technology*. 2005. Vol. 39. Issue 14. P. 5488–5493. <https://doi.org/10.1021/es050316c>

7. Oh S.E., Min B., Logan B.E. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells // *Environmental Science & Technology*. 2004. Vol. 38. Issue 18. P. 4900–4904. <https://doi.org/10.1021/es049422p>
8. Pham T.H., Jang J.K., Chang I.S., Kim B.H. Improvement of cathode reaction of a mediator-less microbial fuel cell // *Journal of Microbial Biotechnology*. 2004. Vol. 14. Issue 2. P. 324–329.
9. Yagishita T., Sawayama S., Tsukahara K.-I., Ogi T. Effects of intensity of incident light and concentrations of *Synechococcus* sp. and 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone on the current output of photosynthetic electrochemical cell // *Solar Energy*. 1997. Vol. 61. Issue 5. P. 347–353. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00069-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00069-8)
10. Juang D.F., Lee C.H., Hsueh S.C. Comparison of electrogenic capabilities of microbial fuel cell with different light power on algae grown cathode // *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 123. P. 23–29. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.041>
11. Del Campo A.G., Cañizares P., Rodrigo M.A., Fernández F.J., Lobato J. Microbial fuel cell with an algae-assisted cathode: A preliminary assessment // *Journal of Power Sources*. 2013. Vol. 242. P. 638–645. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.110>
12. Singh S.P., Singh P. Effect of CO₂ concentration on algal growth: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 38. P. 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.043>
13. Fu C.-C., Hung T.-C., Wu W.-T., Wen T.-C., Su C.-H. Current and voltage responses in instant photosynthetic microbial cells with *Spirulina platensis* // *Biochemical Engineering Journal*. 2010. Vol. 52. Issues 2–3. P. 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.08.004>
14. Meirong M., Xiaoju Sh., Limin C., Zongwu D. The operation of photosynthetic microbial fuel cells powered by *Anabaena variabilis*. In: *Proceedings of 2013 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment*. 2013. P. 968–972. <https://doi.org/10.1109/ICMREE.2013.6893833>
15. Cao Y., Mu H., Liu W., Zhang R., Guo J., Xian M., Liu H. Electricigens in the anode of microbial fuel cells: pure cultures versus mixed communities // *Microbial Cell Factories*. 2019. Vol. 18. Issue 1. Article number 39. <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1087-z>
16. Aiyer K.S. Synergistic effects in a microbial fuel cell between co-cultures and a photosynthetic alga *Chlorella vulgaris* improve performance // *Heliyon*. 2021. Vol. 7. Issue 1. e05935. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05935>
17. Mao L., Verwoerd W.S. Genome-scale stoichiometry analysis to elucidate the innate capability of the cyanobacterium *Synechocystis* for electricity generation // *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2013. Vol. 40. Issue 10. P. 1161–1180. <https://doi.org/10.1007/s10295-013-1308-0>
18. Hadiyanto H., Christwardana M., Minasheila T., Wijaya Y.H. Effects of Yeast Concentration and Microalgal Species on Improving the Performance of Microalgal-Microbial Fuel Cells (MMFCs) // *International Energy Journal*. 2020. Vol. 20. Issue 3. P. 337–344. <http://www.ericjournal.ait.ac.th/index.php/eric/article/view/2337>
19. Strik D.P.B.T.B., Hamelers H.V.M., Buisman C.J.N. Solar energy powered microbial fuel cell with a reversible bioelectrode // *Environmental Science & Technology*. 2010. Vol. 44. Issue 1. P. 532–537. <https://doi.org/10.1021/es902435v>
20. Otadi M., Poormohamadian S., Zabihi F., Goharrokhi M. Microbial fuel cell production with alga // *World Applied Sciences Journal*. 2011. Vol. 14. P. 91–95.
21. Velasquez-Orta S.B., Curtis T.P., Logan B.E. Energy from algae using microbial fuel cells // *Biotechnology and Bioengineering*. 2009. Vol. 103. Issue 6. P. 1068–1076. <https://doi.org/10.1002/bit.22346>
22. Mahesh S., Tadesse D., Melkamu A. Evaluation of photosynthetic microbial fuel cell for bioelectricity production // *Indian Journal of Energy*. 2013. Vol. 2. Issue 4. P. 116–120.
23. Yadav A.K., Panda P., Rout P., Behara S., Patra A.K., Nayak S.K., et al. Entrapment of algae for waste water treatment and bioelectricity generation in microbial fuel cell. In: *Proceedings of XVIIth International Conference on Bioencapsulation*. 2009. P. 24–26.
24. Logan B.E. *Microbial Fuel Cells*. Wiley, 2008. 216 p. <https://doi.org/10.1002/9780470258590>
25. Powell E.E., Mapiour M.L., Evitts R.W., Hill G.A. Growth kinetics of *Chlorella vulgaris* and its use as a cathodic half-cell // *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100. Issue 1. P. 269–274. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.032>
26. Jiang H.-M., Luo S.-Ju., Shi X.-S., Dai M., Guo R.-B. A system combining microbial fuel cell with photobioreactor for continuous domestic wastewater treatment and bioelectricity generation // *Journal of Central South University*. 2013. Vol. 20. Issue 2. P. 488–494. <https://doi.org/10.1007/s11771-013-1510-2>
27. Pandit S., Ghosh S., Ghangrekar M., Das D. Performance of an anion exchange membrane in association with cathodic parameters in a dual chamber microbial fuel cell // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. Issue 11. P. 9383–9392. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.011>
28. Lan J.C.-W., Raman K., Huang Ch.-M., Chang Ch.-M. The impact of monochromatic blue and red LED light upon performance of photo microbial fuel cells (PMFCs) using *Chlamydomonas reinhardtii* transformation F5 as biocatalyst // *Biochemical Engineering Journal*. 2013. Vol. 78. P. 39–43. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2013.02.007>
29. Strik D.P.B.T.B., Hamelers (Bert) H.V.M., Snel J.F.H., Buisman C.J.N. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell // *International Journal of Energy Research*. 2008. Vol. 32. Issue 9. P. 870–876. <https://doi.org/10.1002/er.1397>
30. Greenman J., Gajda I., Ieropoulos I. Microbial fuel cells (MFC) and microalgae; photo microbial fuel cell (PMFC) as complete recycling machines // *Sustainable Energy & Fuels*. 2019. Vol. 3. Issue 10. P. 2546–2560. <https://doi.org/10.1039/C9SE00354A>

31. Lu A., Li Y., Jin S., Ding H., Zeng C., Wang X., et al. Microbial fuel cell Equipped with a photocatalytic rutile-coated cathode // *Energy & Fuels*. 2010. Vol. 24. Issue 2. P. 1184–1190. <https://doi.org/10.1021/ef901053j>
32. Wang S., Yang X., Zhu Yi., Sua Yu., Li C. Solar-assisted dual chamber microbial fuel cell with a CuInS_2 photocathode. // *RSC Advances*. 2014. Vol. 4. Issue 45. P. 23790–23796. <https://doi.org/10.1039/C4RA02488e>
33. Kim H.-W., Lee K.-S., Razzaq A., Lee S.H., Grimes C.A., In S.-I. Photocoupled bioanode: A new approach for Improved microbial fuel cell performance // *Energy Technology*. 2017. Vol. 6. Issue 2. P. 257–262. <https://doi.org/10.1002/ente.201700465>
34. Kaku N., Yonezawa N., Kodama Yu., Watanabe K. Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2008. Vol. 79. Issue 1. P. 43–49. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1410-9>
35. Lee D.-J., Chang J.-S., Lai J.-Y. Microalgae-microbial fuel cell: A mini review // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 198. P. 891–895. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.061>
36. Lobato J., del Campo A.G., Fernández F.J., Cañizares P., Rodrigo M.A. Lagooning microbial fuel cells: A first approach by coupling electricity-producing microorganisms and algae // *Applied Energy*. 2013. Vol. 110. P. 220–226. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.010>
37. Rodrigo M.A., Cañizares P., García H., Linares J.J., Lobato J. Study of the acclimation stage and of the effect of the biodegradability on the performance of a microbial fuel cell // *Bioresource Technology*. 2009. Vol. 100. Issue 20. P. 4704–4710. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.073>
38. Wang X., Feng Yu., Liu J., Lee H., Li C., Li N., et al. Sequestration of CO_2 discharged from anode by algal cathode in microbial carbon capture cells (MCCs) // *Biosensors and Bioelectronics*. 2010. Vol. 25. Issue 12. P. 2639–2643. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.04.036>
39. Nishio K., Hashimoto K., Watanabe K. Light/electricity conversion by a self-organized photosynthetic biofilm in a single-chamber reactor // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010. Vol. 86. Issue 3. P. 957–964. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2400-2>
40. Zou Y., Pisciotta J., Billymyre R.B., Baskakov I.V. Photosynthetic microbial fuel cells with positive light response // *Biotechnology and Bioengineering*. 2009. Vol. 104. Issue 5. P. 939–946. <https://doi.org/10.1002/bit.22466>
41. Gajda I., Greenman J., Melhuish C., Ieropoulos I. Photosynthetic cathodes for Microbial Fuel Cells // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013. Vol. 38. Issue 26. P. 11559–11564. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.111>
42. Thorne R., Hu H., Schneider K., Bombelli P., Fisher A., Peter L.M., et al. Porous ceramic anode materials for photo-microbial fuel cells // *Journal of Materials Chemistry*. 2011. Vol. 21. Issue 44. P. 18055–18060. <https://doi.org/10.1039/C1JM13058G>
43. Lakshmidevi R., Gandhi N.N., Muthukumar K. Bioelectricity and bioactive compound production in an algal-assisted microbial fuel cell with immobilized bioanode // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00916-6>
44. Kondaveeti S., Mohanakrishna G., Lee J.-K., Kalia V.C. Methane as a substrate for energy generation using microbial fuel cells // *Indian Journal of Microbiology*. 2019. Vol. 59. Issue 1. P. 121–124. <https://doi.org/10.1007/s12088-018-0765-6>
45. He Z., Kan J., Mansfeld F., Angenent L.T., Nealson K.H. Self-sustained phototrophic microbial fuel cells based on the synergistic cooperation between photosynthetic microorganisms and heterotrophic bacteria // *Environmental Science & Technology*. 2009. Vol. 43. Issue 5. P. 1648–1654. <https://doi.org/10.1021/es803084a>
46. Xu C., Poon K., Choi M.M.F., Wang R. Using live algae at the anode of a microbial fuel cell to generate electricity // *Environmental Science and Pollution Research*. 2015. Vol. 22. Issue 20. P. 15621–15635. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4744-8>
47. Bolognesi S., Cecconet D., Callegari A., Capodaglio A.G. Combined microalgal photobioreactor/microbial fuel cell system: Performance analysis under different process conditions // *Environmental Research*. 2021. Vol. 12. Issue 7. P. 110263. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110263>
48. Dasgupta C.N., Gilbert J.J., Lindblad P., Heidorn T., Borgvang S.A., Skjånes K., et al. Recent trends on the development of photobiological processes and photobioreactors for the improvement of hydrogen production // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010. Vol. 35. Issue 19. P. 10218–10238. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.029>
49. Dubini A., Ghirardi M.L. Engineering photosynthetic organisms for the production of biohydrogen // *Photosynthesis Research*. 2015. Vol. 123. Issue 3. P. 241–253. <https://doi.org/10.1007/s11120-014-9991-x>
50. Limongi A.R., Viviano E., de Luca M., Radice R.P., Bianco G., Martelli G. Biohydrogen from microalgae: production and applications // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. Issue 4. P. 1616. <https://doi.org/10.3390/app11041616>
51. Philipps G., Happe T., Hemschemeier A. Nitrogen deprivation results in photosynthetic hydrogen production in *Chlamydomonas reinhardtii* // *Planta*. 2012. Vol. 235. Issue 4. P. 729–745. <https://doi.org/10.1007/s00425-011-1537-2>
52. Batyrova K., Gavrisheva A., Ivanova E., Liu J., Tsygankov A. Sustainable hydrogen photoproduction by phosphorus-deprived marine green microalgae *Chlorella* sp. // *International Journal of Molecular Sciences*. 2015. Vol. 16. Issue 2. P. 2705–2716. <https://doi.org/10.3390/ijms16022705>
53. Volgusheva A.A., Jokel M., Allahverdiyeva Y., Kukarskikh G.P., Lukashev E.P., Lambreva M.D., et al. Comparative analyses of H_2 photoproduction in magnesium- and sulfur-starved *Chlamydomonas reinhardtii* cultures // *Physiologia Plantarum*. 2017. Vol. 161. Issue 1. P. 124–137. <https://doi.org/10.1111/ppl.12576>

54. Fakhimi N., Dubini A., Tavakoli O., González-Ballester D. Acetic acid is key for synergetic hydrogen production in *Chlamydomonas*-bacteria co-cultures // *Bioresource Technology*. 2019. Vol. 289. 121648. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121648>

55. Fakhimi N., Gonzalez-Ballester D., Fernández E., Galván A., Dubini A. Algae-Bacteria Consortia as a Strategy to Enhance H₂ Production // *Cells*. 2020. Vol. 9. Issue 6. 1353. <https://doi.org/10.3390/cells9061353>

56. Markov S.A., Protasov E.S., Bybin V.A., Eivazova E.R., Stom D.I. Using immobilized cyanobacteria and culture medium contaminated with ammonium for H₂ production in a hollow-fiber photobioreactor // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40. Issue 14. P. 4752–4757. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.053>

57. Mata T.M., Martins A.A., Caetano N.S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010. Vol.14. Issue 1. P. 217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>

58. Avagyan A.B., Singh B. Biodiesel from Algae. In: *Biodiesel: Feedstocks, Technologies, Economics and Barriers*. Springer, 2019. P.77–112.

59. Farooq A., Khan A.U., Yasar A. Transesterification of oil extracted from different species of algae for biodiesel production // *African Journal of Environmental Science and Technology*. 2013. Vol. 7. Issue 6. P. 358–364. <https://doi.org/10.5897/AJEST12.167>

60. Mohammadi M., Azizollahi-Aliabadi M. Biodiesel production from microalgae // *Journal of Biology*

and Today's World. 2013. Vol. 2 Issue 2. P. 38–42. <https://doi.org/10.15412/J.JBTW.01020204>

61. Blinová L., Bartošová A., Gerulová K. Cultivation of microalgae (*Chlorella vulgaris*) for biodiesel production // *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*. 2015. Vol. 23. Issue 36. P. 87–95. <https://doi.org/10.1515/rput-2015-0010>

62. Chader S, Hacene H., Agathos S.N. Study of hydrogen production by three strains of *Chlorella* isolated from the soil in the Algerian Sahara // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009. Vol. 34. Issue 11. P. 4941–4946. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.058>

63. Tsygankov A.A., Hall D.O., Liu J., Rao K.K. An automated helical photo bioreactor incorporating cyanobacteria for continuous hydrogen production. In: *Zaborsky O.R. (ed.) Biohydrogen*. London: Plenum Press, 1998. P. 431–440. https://doi.org/10.1007/978-0-585-35132-2_52

64. Barros A.I., Gonçalves A.L., Simões M., Pires J.C.M. Harvesting techniques applied to microalgae: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 41. P. 1489–1500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.037>

65. Atabani A.E., Silitonga A.S., Badruddin I.A., Mahlia T.M.I., Masjuki H.H., Mekhilef S. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. Issue 4. P. 2070–2093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>

REFERENCES

1. Skjånes K, Rebours C, Lindblad P. Potential for green microalgae to produce hydrogen, pharmaceuticals and other high value products in a combined process. *Critical Reviews in Biotechnology*. 2013;33(2): 172–215. <https://doi.org/10.3109/07388551.2012.681625>

2. Vershinin A. Biological functions of carotenoids-diversity and evolution. *Biofactors*. 1999;10(2-3):99–104. <https://doi.org/10.1002/biof.5520100203>

3. Chisti Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*. 2007;25(3):294–306. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>

4. Ullah K, Ahmad M, Sharma VK, Lu P, Harvey A, Zafar M, et al. Algal biomass as a global source of transport fuels: Overview and development perspectives. *Progress in Natural Science: Materials International*. 2014;24(4):329–339. <https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2014.06.008>

5. Olivieri G, Salatino P, Marzocchella A. Advances in photobioreactors for intensive microalgal production: Configurations, operating strategies and applications. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2013;89(2):178–195. <https://doi.org/10.1002/jctb.4218>

6. Liu H, Cheng S, Logan BE. Power generation in fed-batch microbial fuel cells as a function of ionic strength, temperature, and reactor configuration. *Environmental Science & Technology*. 2005;39(14):5488–5493. <https://doi.org/10.1021/es050316c>

7. Oh SE, Min B, Logan BE. Cathode performance as a factor in electricity generation in microbial fuel cells. *Environmental Science & Technology*. 2004;38(18):4900–4904. <https://doi.org/10.1021/es049422p>

8. Pham TH, Jang JK, Chang IS, Kim BH. Improvement of cathode reaction of a mediator-less microbial fuel cell. *Journal of Microbial Biotechnology*. 2004;14(2):324–329.

9. Yagishita T, Sawayama S, Tsukahara K-I, Ogi T. Effects of intensity of incident light and concentrations of *Synechococcus* sp. and 2-hydroxy-1,4-naphthoquinone on the current output of photosynthetic electrochemical cell. *Solar Energy*. 1997;61(5):347–353. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(97\)00069-8](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(97)00069-8)

10. Juang DF, Lee CH, Hsueh SC. Comparison of electrogenic capabilities of microbial fuel cell with different light power on algae grown cathode. *Bioresource Technology*. 2012;123:23–29. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.041>

11. Del Campo AG, Cañizares P, Rodrigo MA, Fernández FJ, Lobato J. Microbial fuel cell with an algae-assisted cathode: A preliminary assessment. *Journal of Power Sources*. 2013;242:638–645. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.110>

12. Singh SP, Singh P. Effect of CO₂ concentration on algal growth: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014;38:172–179. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.043>

13. Fu C-C, Hung T-C, Wu W-T, Wen T-C, Su C-H. Current and voltage responses in instant photosynthetic microbial cells with *Spirulina platensis*. *Biochemical Engineering Journal*. 2010;52(2-3):175–180. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2010.08.004>
14. Meirong M, Xiaoju Sh, Limin C, Zongwu D. The operation of photosynthetic microbial fuel cells powered by *Anabaena variabilis*. In: *Proceedings of 2013 International Conference on Materials for Renewable Energy and Environment*. 2013, p. 968–972. <https://doi.org/10.1109/ICMREE.2013.6893833>
15. Cao Y, Mu H, Liu W, Zhang R, Guo J, Xian M, Liu H. Electricigens in the anode of microbial fuel cells: pure cultures versus mixed communities. *Microbial Cell Factories*. 2019;18(1). Article number 39. <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1087-z>
16. Aiyer KS. Synergistic effects in a microbial fuel cell between co-cultures and a photosynthetic alga *Chlorella vulgaris* improve performance. *Heliyon*. 2021;7(1):e05935. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05935>
17. Mao L, Verwoerd WS. Genome-scale stoichiometry analysis to elucidate the innate capability of the cyanobacterium *Synechocystis* for electricity generation. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*. 2013;40(10):1161–1180. <https://doi.org/10.1007/s10295-013-1308-0>
18. Hadiyanto H, Christwardana M, Minasheila T, Wijaya YH. Effects of Yeast Concentration and Microalgal Species on Improving the Performance of Microalgal-Microbial Fuel Cells (MMFCs). *International Energy Journal*. 2020;20(3):337–344. <http://www.rericjournal.ait.ac.th/index.php/reric/article/view/2337>
19. Strik DPBTB, Hamelers HVM, Buisman CJN. Solar energy powered microbial fuel cell with a reversible bioelectrode. *Environmental Science & Technology*. 2010;44(1):532–537. <https://doi.org/10.1021/es902435v>
20. Otadi M, Poormohamadian S, Zabihi F, Goharrokhi M. Microbial fuel cell production with alga. *World Applied Sciences Journal*. 2011;14:91–95.
21. Velasquez-Orta SB, Curtis TP, Logan BE. Energy from algae using microbial fuel cells. *Biotechnology and Bioengineering*. 2009;103(6):1068–1076. <https://doi.org/10.1002/bit.22346>
22. Mahesh S, Tadesse D, Melkamu A. Evaluation of photosynthetic microbial fuel cell for bioelectricity production. *Indian Journal of Energy*. 2013;2(4):116–120.
23. Yadav AK, Panda P, Rout P, Behara S, Patra AK, Nayak SK, et al. Entrapment of algae for waste water treatment and bioelectricity generation in microbial fuel cell. In: *Proceedings of XVIIth International Conference on Bioencapsulation*. 2009, p. 24–26.
24. Logan BE. *Microbial Fuel Cells*. John Wiley & Sons; 2008. 216 p. <https://doi.org/10.1002/9780470258590>
25. Powell EE, Mapiour ML, Evitts RW, Hill GA. Growth kinetics of *Chlorella vulgaris* and its use as a cathodic half-cell. *Bioresource Technology*. 2009;100(1):269–274. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.032>
26. Jiang H-M, Luo S-Ju, Shi X-S, Dai M, Guo R-B. A system combining microbial fuel cell with photobioreactor for continuous domestic wastewater treatment and bioelectricity generation. *Journal of Central South University*. 2013;20(2):488–494. <https://doi.org/10.1007/s11771-013-1510-2>
27. Pandit S, Ghosh S, Ghangrekar M, Das D. Performance of an anion exchange membrane in association with cathodic parameters in a dual chamber microbial fuel cell. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012;37(11):9383–9392. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.03.011>
28. Lan JC-W, Raman K, Huang Ch-M, Chang Ch-M. The impact of monochromatic blue and red LED light upon performance of photo microbial fuel cells (PMFCs) using *Chlamydomonas reinhardtii* transformation F5 as biocatalyst. *Biochemical Engineering Journal*. 2013;78:39–43. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2013.02.007>
29. Strik DPBTB, Hamelers (Bert) HVM, Snel JFH, Buisman CJN. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*. 2008;32(9):870–876. <https://doi.org/10.1002/er.1397>
30. Greenman J, Gajda I, Ieropoulos I. Microbial Fuel Cells (MFC) and microalgae; Photo Microbial Fuel Cell (PMFC) as complete recycling machines. *Sustainable Energy & Fuels*. 2019;3(10):2546–2560. <https://doi.org/10.1039/C9SE00354A>
31. Lu A, Li Y, Jin S, Ding H, Zeng C, Wang X, et al. Microbial fuel cell equipped with a photocatalytic rutile-coated cathode. *Energy & Fuels*. 2010;24(2):1184–1190. <https://doi.org/10.1021/ef901053j>
32. Wang S, Yang X, Zhu Yi, Sua Yu, Li C. Solar-assisted dual chamber microbial fuel cell with a CuInS_2 photocathode. *RSC Advances*. 2014;4(45):23790–23796. <https://doi.org/10.1039/C4RA02488e>
33. Kim H-W, Lee K-S, Razzaq A, Lee SH, Grimes CA, In S-I. Photocoupled bioanode: A new approach for improved microbial fuel cell performance. *Energy Technology*. 2017;6(2):57–262. <https://doi.org/10.1002/ente.201700465>
34. Kaku N, Yonezawa N, Kodama Yu, Watanabe K. Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2008;79(1):43–49. <https://doi.org/10.1007/s00253-008-1410-9>
35. Lee D-J, Chang J-S, Lai J-Y. Microalgae-microbial fuel cell: A mini review. *Bioresource Technology*. 2015;198:891–895. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.061>
36. Lobato J, del Campo AG, Fernández FJ, Cañizares P, Rodrigo MA. Lagooning microbial fuel cells: A first approach by coupling electricity-producing microorganisms and algae. *Applied Energy*. 2013;110:220–226. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.010>
37. Rodrigo MA, Cañizares P, García H, Linares JJ, Lobato J. Study of the acclimation stage and of the effect of the biodegradability on the performance of a microbial fuel cell. *Bioresource Technology*. 2009;100(20):4704–4710. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.073>
38. Wang X, Feng Yu, Liu J, Lee H, Li C, Li N, et al. Sequestration of CO_2 discharged from anode by algal

- cathode in microbial carbon capture cells (MCCs). *Biosensors and Bioelectronics*. 2010;25(12):2639–2643. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2010.04.036>
39. Nishio K, Hashimoto K, Watanabe K. Light/electricity conversion by a self-organized photosynthetic biofilm in a single-chamber reactor. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2010;86(3):957–964. <https://doi.org/10.1007/s00253-009-2400-2>
40. Zou Y, Pisciotta J, Billmyre RB, Baskakov IV. Photosynthetic microbial fuel cells with positive light response. *Biotechnology and Bioengineering*. 2009;104(5):939–946. <https://doi.org/10.1002/bit.22466>
41. Gajda I, Greenman J, Melhuish C, Ieropoulos I. Photosynthetic cathodes for Microbial Fuel Cells. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2013;38(26):11559–11564. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.111>
42. Thorne R, Hu H, Schneider K, Bombelli P, Fisher A, Peter LM, et al. Porous ceramic anode materials for photo-microbial fuel cells. *Journal of Materials Chemistry*. 2011;21(44):18055–18060. <https://doi.org/10.1039/C1JM13058G>
43. Lakshmi Devi R, Gandhi NN, Muthukumar K. Bioelectricity and bioactive compound production in an algal-assisted microbial fuel cell with immobilized bioanode. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00916-6>
44. Kondaveeti S, Mohanakrishna G, Lee J-K, Kalva VC. Methane as a substrate for energy generation using microbial fuel cells. *Indian Journal of Microbiology*. 2019;59(1):121–124. <https://doi.org/10.1007/s12088-018-0765-6>
45. He Z, Kan J, Mansfeld F, Angenent LT, Nealson KH. Self-sustained phototrophic microbial fuel cells based on the synergistic cooperation between photosynthetic microorganisms and heterotrophic bacteria. *Environmental Science & Technology*. 2009;43(5):1648–1654. <https://doi.org/10.1021/es803084a>
46. Xu C, Poon K, Choi MMF, Wang R. Using live algae at the anode of a microbial fuel cell to generate electricity. *Environmental Science and Pollution Research*. 2015;22(20):15621–15635. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4744-8>
47. Bolognesi S, Cecconet D, Callegari A, Capodaglio AG. Combined microalgal photobioreactor/microbial fuel cell system: Performance analysis under different process conditions. *Environmental Research*. 2021;12(7): 110263. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110263>
48. Dasgupta CN, Gilbert JJ, Lindblad P, Heidom T, Borgvang SA, Skjånes K, et al. Recent trends on the development of photobiological processes and photobioreactors for the improvement of hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2010;35(19):10218–10238. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.029>
49. Dubini A, Ghirardi ML. Engineering photosynthetic organisms for the production of biohydrogen. *Photosynthesis Research*. 2015;123(3):241–253. <https://doi.org/10.1007/s11120-014-9991-x>
50. Limongi AR, Viviano E, de Luca M, Radice RP, Bianco G, Martelli G. Biohydrogen from microalgae: production and applications. *Applied Sciences*. 2021;11(4):1616. <https://doi.org/10.3390/app11041616>
51. Philipps G, Happe T, Hemschemeier A. Nitrogen deprivation results in photosynthetic hydrogen production in *Chlamydomonas reinhardtii*. *Planta*. 2012;235(4):729–745. <https://doi.org/10.1007/s00425-011-1537-2>
52. Batyrova K, Gavrishcheva A, Ivanova E, Liu J, Tsygankov A. Sustainable hydrogen photoproduction by phosphorus-deprived marine green microalgae *Chlorella* sp. *International Journal of Molecular Sciences*. 2015;16(2):2705–2716. <https://doi.org/10.3390/ijms16022705>
53. Volgusheva AA, Jokel M, Allahverdiyeva Y, Kukarskikh GP, Lukashev EP, Lambreva MD, et al. Comparative analyses of H₂ photoproduction in magnesium- and sulfur-starved *Chlamydomonas reinhardtii* cultures. *Physiologia Plantarum*. 2017;161(1):124–137. <https://doi.org/10.1111/ppl.12576>
54. Fakhimi N, Dubini A, Tavakoli O, González-Ballester D. Acetic acid is key for synergetic hydrogen production in *Chlamydomonas*-bacteria co-cultures. *Bioresource Technology*. 2019;289: 121648. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121648>
55. Fakhimi N, Gonzalez-Ballester D, Fernández E, Galván A, Dubini A. Algae-Bacteria Consortia as a Strategy to Enhance H₂ Production. *Cells*. 2020;9(6):1353. <https://doi.org/10.3390/cells9061353>
56. Markov SA, Protasov ES, Bybin VA, Eivazova ER, Stom DI. Using immobilized cyanobacteria and culture medium contaminated with ammonium for H₂ production in a hollow-fiber photobioreactor. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015;40(14):4752–4757. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.02.053>
57. Mata TM, Martins AA, Caetano NS. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010;14(1):217–232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
58. Avagyan AB, Singh B. Biodiesel from Algae. In: *Biodiesel: Feedstocks, Technologies, Economics and Barriers*. Springer; 2019, p.77–112.
59. Farooq A, Khan AU, Yasar A. Transesterification of oil extracted from different species of algae for biodiesel production. *African Journal of Environmental Science and Technology*. 2013;7(6):358–364. <https://doi.org/10.5897/AJEST12.167>
60. Mohammadi M, Azizollahi-Aliabadi M. Biodiesel production from microalgae. *Journal of Biology and Today's World*. 2013;2(2):38–42. <https://doi.org/10.15412/J.JBTW.01020204>
61. Blinová L, Bartošová A, Gerulová K. Cultivation of microalgae (*Chlorella vulgaris*) for biodiesel production. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*. 2015;23(36):87–95. <https://doi.org/10.1515/rput-2015-0010>
62. Samira C, Hacene H, Agathos SN. Study of hydrogen production by three strains of *Chlorella* isolated from the soil in the Algerian Sahara. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2009;34(11):4941–4946. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.10.058>
63. Tsygankov AA, Hall DO, Liu J, Rao KK. An au-

tomated helical photo bioreactor incorporating cyanobacteria for continuous hydrogen production. In: Zaborovsky OR (ed.) *Biohydrogen*. London: Plenum Press; 1998, p. 431–440. https://doi.org/10.1007/978-0-585-35132-2_52

64. Barros AI, Gonçalves AL, Simões M, Pires JCM. Harvesting techniques applied to microalgae: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015;41:1489–1500. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.09.037>

65. Atabani AE, Silitonga AS, Badruddin IA, Mahlia TMI, Masjuki HH, Mekhilef S. A comprehensive review on biodiesel as an alternative energy resource and its characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012;16(4):2070–2093. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.003>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Коновалов Михаил Сергеевич,
научный сотрудник,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
✉ e-mail: mikkonovalev@yandex.ru

Коновалова Елена Юрьевна,
научный сотрудник,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
e-mail: elenka_kvasya@list.ru

Егорова Ирина Николаевна,
к.б.н., старший научный сотрудник,
Сибирский институт физиологии и биохимии
растений СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 132,
Российская Федерация,
e-mail: egorova@sifibr.irk.ru

Жданова Галина Олеговна,
научный сотрудник,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
e-mail: zhdanova86@ya.ru

Стом Дэвард Иосифович,
д.б.н., профессор,
заведующий лабораторией водной
токсикологии,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация;
главный научный сотрудник,
Байкальский музей Иркутского научного центра,
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,
Российская Федерация,
e-mail: stomd@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта ин-
тересов.

*Все авторы прочитали и одобрили оконча-
тельный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 09.03.2021.
Одобрена после рецензирования 15.08.2021.
Принята к публикации 30.08.2021.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail S. Konovalev,
Researcher,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
✉ e-mail: mikkonovalev@yandex.ru

Elena Yu. Konovalova,
Researcher,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
e-mail: elenka_kvasya@list.ru

Irina N. Egorova,
Cand. Sci. (Biology), Senior Researcher,
Siberian Institute of Plant Physiology
and Biochemistry SB RAS,
132, Lermontov St., Irkutsk, 664033,
Russian Federation,
e-mail: egorova@sifibr.irk.ru

Galina O. Zhdanova,
Researcher,
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
e-mail: zhdanova86@ya.ru

Devard I. Stom,
Dr. Sci. (Biology), Professor,
Head of the laboratory of Aquatic Toxicology
Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
Chief Researcher,
Baikal Museum ISC,
1, Academicheskaya St., Listvyanka, 664520,
Russian Federation,
e-mail: stomd@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests re-
garding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and ap-
proved by all the co-authors.*

*The article was submitted 09.03.2021.
Approved after reviewing 15.08.2021.
Accepted for publication 30.08.2021.*