

Оригинальная статья

УДК 620.95

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.2.201-222>**Модификация электродов для увеличения генерации
электроэнергии в растительных микробных топливных элементах****Р.В. Лепикаш¹✉, Н.С. Захаров¹, П.В. Оськин¹, Д.И. Стом^{2,3,4}, Д.Г. Лаврова¹, С.В. Алферов¹**¹Тульский государственный университет, г. Тула, Россия²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия³Байкальский музей Сибирского отделения РАН, п. Листвянка, Россия⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия✉mr.romalep@yandex.ru**Аннотация**

Растительные микробные топливные элементы (РМТЭ) представляют собой альтернативу традиционным источникам электроэнергии, однако их применение ограничено невысокими электрохимическими характеристиками. Для повышения производительности РМТЭ используют различные модификации электродов. Проведено электрохимическое осаждение MnO_2 на поверхность углеродного войлока с последующим использованием в качестве бифункционального материала для анода и катода в системах РМТЭ. Сравнение образцов углеродного войлока проводили по значениям электроактивной площади поверхности и количеству дефектов, установленных с помощью циклической вольтамперометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния соответственно. Мощность систем РМТЭ составила 15, 2 и 33 мВт/м² для контрольной системы РМТЭ, РМТЭ-анод- MnO_2 и РМТЭ-катод- MnO_2 соответственно. Применение MnO_2 на катоде в составе РМТЭ обеспечивает двукратное увеличение генерации энергии.

Ключевые слова: углеродный войлок, биоэлектрохимические системы, растительные микробные топливные элементы, возобновляемая электроэнергия.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках государственного задания № FEWG-2024-0003 «Биокаталитические системы на основе клеток микроорганизмов, субклеточных структур и ферментов в сочетании с наноматериалами».

Для цитирования: Лепикаш Р.В., Захаров Н.С., Оськин П.В., Стом Д.И., Лаврова Д.Г., Алферов С.В. Модификация электродов для увеличения генерации электроэнергии в растительных микробных топливных элементах // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2025. Т. 167, кн. 2. С. 201–222. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.2.201-222>.

Original article

<https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.2.201-222>

Modification of electrodes to boost electricity generation in plant microbial fuel cells

R.V. Lepikash¹✉, N.S. Zakharov¹, P.V. Oskin¹, D.I. Stom^{2,3,4}, D.G. Lavrova¹, S.V. Alferov¹

¹Tula State University, Tula, Russia

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Baikal Museum, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Listvyanka, Russia

⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

✉mr.romalep@yandex.ru

Abstract

Plant microbial fuel cells (PMFC) offer a promising alternative to traditional electricity sources. However, their practical application is limited due to poor electrochemical performance, which is enhanced using various electrode modifications. In this study, MnO_2 was electrochemically deposited on the surface of carbon felt and then used as a bifunctional material for the anode and cathode configurations in PMFC systems. The modified carbon felt samples were characterized in terms of electrochemically active surface area and the number of defects determined using cyclic voltammetry and Raman spectroscopy. The resulting density power was 15, 2, and 33 mW/m^2 for the control system, PMFC-anode- MnO_2 , and PMFC-cathode- MnO_2 , respectively. Thus, the deposition of MnO_2 on the cathode in PMFC systems results in a twofold increase of electrical energy generation.

Keywords: carbon felt, bioelectrochemical systems, plant microbial fuel cells, renewable energy

Acknowledgments. This study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of state assignment no. FEWG-2024-0003 “Biocatalytic systems based on microbial cells, subcellular structures, and enzymes in combination with nanomaterials”.

For citation: Lepikash R.V., Zakharov N.S., Oskin P.V., Stom D.I., Lavrova D.G., Alferov S.V. Modification of electrodes to boost electricity generation in plant microbial fuel cells. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2025, vol. 167, no. 2, pp. 201–222. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2025.2.201-222>. (In Russian)

Введение

Растущее загрязнение окружающей среды и выбросы углекислого газа оказывают негативное влияние на здоровье человека и состояние экосистемы, что требует постепенного перехода к устойчивым источникам энергии, включая солнечные, ветряные и гидроэлектростанции [1]. Возможной альтернативой традиционным источникам электроэнергии рассматриваются топливные элементы, которые работают как эффективные устройства преобразования энергии химических связей в электричество, обеспечивающие работу различных маломощных устройств [2].

Примером топливных элементов являются электрохимические ячейки, созданные на основе биологических объектов, которые могут преобразовать энергию химических связей субстратов в электричество под действием ферментативных систем микроорганизмов [3]. Технология биологических топливных элементов возникла на стыке микробиологии, химии и физики [4]. К подобным системам относят растительный микробный топливный элемент (РМТЭ), принцип работы которого основан на окислении корневых экссудатов растений и вносимых субстратов микроорганизмами, обитающими в анодной области, с последующей генерацией электроэнергии. Тем не менее, широкое внедрение РМТЭ ограничено из-за низких значений вырабатываемой энергии, причиной чего могут служить в том числе и используемые материалы электродной системы. Как правило, при создании анодов и катодов используются углеродные материалы [5, 6], отличающиеся высоким удельным сопротивлением по сравнению с металлами, что негативно сказывается на мощности биоэлектрохимических систем. Однако металлические электроды склонны к коррозии [7], характеризуются высокой стоимостью, что ограничивает их использование в биоэлектрохимических системах. Кроме того, ионы металлов способны оказывать ингибирующее воздействие на микроорганизмы, что также негативно сказывается на вырабатываемой мощности биотопливного элемента [5]. Углеродные материалы обладают высокой коррозионной стойкостью, низкой стоимостью, большей площадью поверхности электродов и практически не оказывают негативного влияния на микроорганизмы. Поэтому углеродные материалы являются перспективными для применения в биоэлектрохимических системах [8, 9].

Для улучшения характеристик углеродных материалов (снижения сопротивления, увеличения электроактивной площади поверхности) используют различные подходы, основанные на адсорбции наноматериалов [10, 11] и нанесении пористых и проводящих полимерных покрытий [12, 13] на поверхность электродов. В работе [14] показано, что мощность микробного топливного элемента с использованием электрода из углеродного войлока с адсорбированным на его поверхности оксидом графена составляет 132 мВт/м² относительно 55.8 мВт/м² для контрольной системы вследствие увеличения удельной поверхности модифицированного электрода и скорости переноса электронов, а также адсорбции микроорганизмов [15]. Установлено, что присутствие наночастиц магнетита (Fe₃O₄) на поверхности электрода увеличивает мощность микробного топливного элемента практически в 1.5 раза (с 255 до 391 мВт/м²) [16]. Однако в ряде случаев процесс модификации является трудоемким [17] или предполагает применение токсичных соединений [18] (рис. 1).

Одними из недорогих и быстрых подходов к улучшению характеристик анода из углеродных материалов для использования в микробных топливных элементах являются электрохимические способы модификации [19–21]. Так, в работе [22] анод из углеродной сетки окисляли электрохимически в растворе HNO₃. При использовании модифицированного материала в составе микробного топливного элемента наблюдалось увеличение потенциала с 510 мВ до 540 мВ, что обусловлено снижением потенциала анода за счет улучшения адгезии микроорганизмов. Продемонстрирована возможность использования электрохимических способов модификации анода микробных топливных элементов, обеспечивающих увеличение параметров генерации электроэнергии в системе [21, 22].

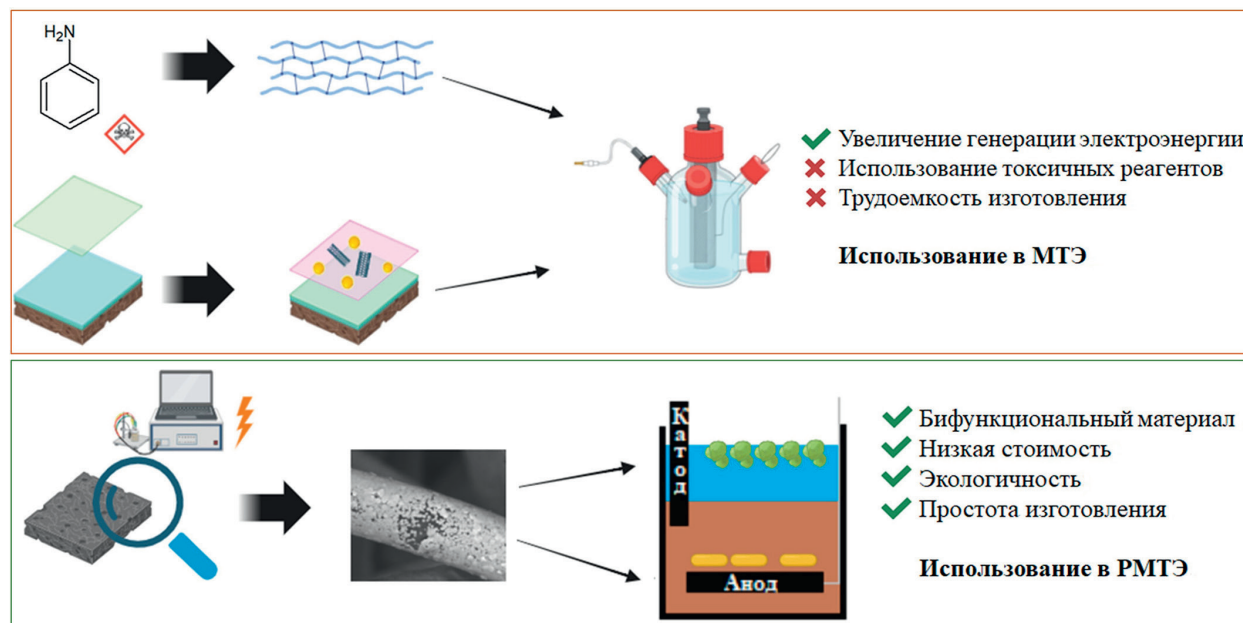


Рис. 1. Подходы к модификации углеродных материалов

Fig. 1. Strategies to the modify carbon materials

Наибольший интерес в качестве модифицирующего агента для электродов в микробных топливных элементах представляет диоксид марганца (MnO_2) [23–26]. Он проявляет высокую каталитическую активность в реакции восстановления кислорода и используется в качестве замены более дорогостоящей платины [27]. Кроме того, MnO_2 применяют в составе материала анода [28–30]. Так, анод из углеродного войлока с нанесенным MnO_2 демонстрирует увеличение удельной мощности микробного топливного элемента в 6.21 раз (до 2754 мВт/м²) по сравнению с немодифицированным углеродным войлоком [28]. Простое электроосаждение MnO_2 на поверхность углеродного войлока также приводит к росту мощности микробного топливного элемента на 24 % [29]. Показано, что использование MnO_2 -модифицированного анода обеспечивает улучшение характеристик электронного переноса от микроорганизмов к электроду [31, 32]. Таким образом, электроосаждение MnO_2 можно рассматривать как эффективный, доступный и простой способ улучшения операционных параметров в биоэлектрохимических системах (рис. 1) с перспективами последующего масштабирования.

Исходя из вышеизложенного, представляет практический интерес использование углеродного войлока с электроосажденным MnO_2 в качестве электродов в РМТЭ. Цель настоящей работы состоит в оценке влияния электрохимической модификации электродов из углеродных материалов на электрохимические характеристики РМТЭ. Для демонстрации возможностей масштабирования выбранного метода электроосаждение MnO_2 проводили на электродах с большой геометрической площадью (25 см² для катода и 50 см² для анода). Модифицированные электроды охарактеризованы с помощью циклической вольтамперометрии и спектроскопии комбинационного рассеяния, которая позволила выявить влияние способа модификации на характеристики структуры материала электрода. Для подтверждения электроосаждения MnO_2 на поверхность электродного материала и оценки биообрастания поверхности анода РМТЭ использована сканирующая электронная микроскопия.

1. Материалы и методы

1.1. Культивирование растений и микроорганизмов. Растительным компонентом являлась ряска малая (*Lemna minor* L.). Биомассу ряски выращивали согласно ГОСТ 32426-2013 [33] при температуре 22–25 °С при постоянном освещении 10000 лк.

Штамм *Pseudomonas chlororaphis* ВКМ В-2188D (*Ps. chlororaphis*) из лаборатории биологии плазмид Института биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук» любезно предоставлен И.Ф. Пунтус. Штамм депонирован во Всероссийской коллекции микроорганизмов Института биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина РАН – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Пушкинский научный центр биологических исследований Российской академии наук».

Бактерии *Ps. chlororaphis* культивировали на среде LB [34]. Состав жидкой среды: пептон – 10 г/дм³, дрожжевой экстракт – 5 г/дм³, хлорид натрия – 10 г/дм³. Среду для культивирования стерилизовали автоклавированием при давлении 1 атм в течение 45 мин. Бактерии выращивали аэробно в течении 20–24 ч в колбах Эрленмейера объемом 750 см³ при температуре 29 °С. Полученную биомассу центрифугировали при комнатной температуре при 10000 об/мин в течение 10 мин и двукратно отмывали от культуральной среды 20 мМ фосфатным буферным раствором рН 6.8. Определяли массу осевших клеток, проводили разбавление и затем наносили на анод РМТЭ.

1.2. Модификация углеродного войлока и их характеристики. Электроосаждение MnO₂ на углеродный войлок проводили в потенциостатическом режиме в течение 4 ч при потенциале 1.0 В относительно насыщенного хлоридсеребряного электрода из раствора MnCl₂ с концентрацией 280 мкг/см³ по иону Mn²⁺ в среде 0.05 моль/дм³ NH₄Cl в качестве фоновой электролита согласно методике [35]. В качестве вспомогательного электрода выступал графитовый стержень. Полученный материал обозначали как ЭОс-MnO₂.

Для подтверждения модификации электродов использовали сканирующую электронную микроскопию в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией на сканирующем электронном микроскопе Hitachi TM4000 Plus (Hitachi, Япония) с приставкой Bruker EDS (Bruker, Германия) при ускоряющем напряжением 15 кВ и времени накопления 5 мин. Изображения поверхности углеродного войлока до и после электроосаждения MnO₂ получали на оптическом инвертированном микроскопе Axiovert 40 MAT (Carl Zeiss, Германия).

Спектры комбинационного рассеяния регистрировали на приборе DXR Raman Microscope (Thermo Fisher Scientific Inc., США) при длине волны лазерного излучения 532 нм. Обработку полученных спектров проводили с использованием программного обеспечения OMNIC for Dispersive Raman (Thermo Fisher Scientific Inc., США).

1.3. Электрохимические измерения. Для определения электроактивной площади поверхности использовали циклическую вольтамперометрию. Измерения проводили на потенциостате CS1350 (CorrTest, KHP) в трехэлектродной ячейке, состоящей из рабочего электрода (образцы модифицированного углеродного войлока), вспомогательного электрода (платиновая фольга 1 × 1 × 0.1 см) и электрода сравнения (насыщенный хлоридсеребряный электрод). В качестве электролита использовали 0.1 М KCl с добавлением 2.5 мМ K₃[Fe(CN)₆]. Сканирование потенциала проводили в диапазоне от –0.2 В до 0.7 В при ско-

рости развертки от 5 до 175 мВ/с. Электроактивную площадь поверхности рассчитывали по уравнению Рэндлса–Шевчика для необратимых систем (при $n\Delta E \geq 212$ мВ) (уравнение 1):

$$I_p = 0.496n\sqrt{1-\alpha}FAc\sqrt{\frac{Dn'Fv}{RT}}, \quad (1)$$

где I_p – ток анодного пика, А; n – число электронов, участвующих в редокс-реакции; n' – число электронов, переносимых в лимитирующей стадии (предполагая, что $n = n'$); F – постоянная Фарадея, 96485 Кл/моль; A – электроактивная площадь поверхности, см²; c – концентрация гексацианоферрат(III) ионов, моль/см³, D – коэффициент диффузии гексацианоферрат(III) ионов, 6×10⁻⁶ см²/с; v – скорость развертки потенциала, В/с; R – универсальная газовая постоянная, 8.314 Дж/(К×моль); T – температура, 293 К; $1-\alpha$ – коэффициент переноса электрона для анодного процесса (0.5).

Измерения электрохимического импеданса проводили в трехэлектродной ячейке при амплитуде переменного тока 5 мВ и частоте от 100 кГц до 0.01 Гц с добавлением 2.5 мМ K₃[Fe(CN)₆]. Потенциал поляризации соответствовал потенциалу полуволны $E_{1/2}$ по данным циклической вольтамперометрии.

1.4. Конструкция РМТЭ. Для изготовления электродов углеродный войлок (ПАН, Китай) нарезали на кусочки с площадью 25 см² для катода и 50 см² для анода, помещали в 4 моль/дм³ соляную кислоту на 4 дня, а затем промывали дистиллированной водой до pH 7 [36]. Электроосаждение MnO₂ на полученный углеродный войлок проводили согласно п. 1.2.

Для создания РМТЭ, песок с диаметром частиц 0.2–0.4 мм прокаливали в печи в течение 40 мин при 160 °С. Затем 100 см³ прокаленного песка помещали в контейнеры объемом 1 л, на дно горизонтально размещали анод со вставленной в него титановой проволокой толщиной 0.8 мм с термоусадкой, обеспечивающей изоляцию проволоки от контакта с водой. На анод равномерно наносили 2.5 см³ суспензии микроорганизмов (250 мг) с питательной средой и досыпали 400 см³ песка. Катод закрепляли вертикально сбоку. Растения *Lemna minor* L. вносили в количестве 8.64 г на каждый РМТЭ (рис. 2). Модифицированные MnO₂ электроды использовали в качестве анода или катода. Рассматривали биоэлектрохимические системы РМТЭ-контроль, РМТЭ-анод-MnO₂ и РМТЭ-катод-MnO₂.

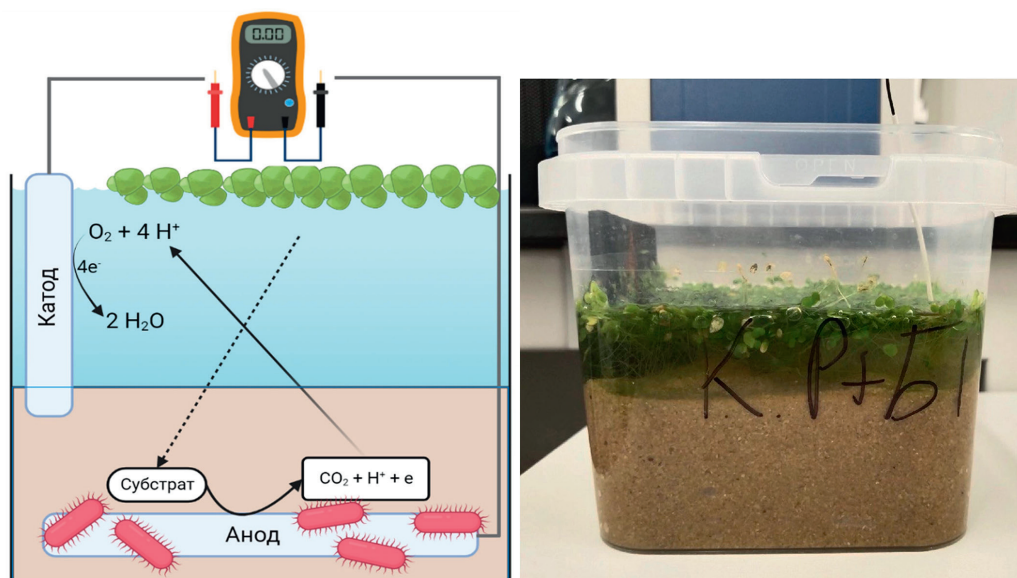


Рис. 2. Схема функционирования и лабораторная модель исследуемых РМТЭ

Fig. 2. Functional schematic and laboratory model of the studied PMFC

Для определения мощности исследуемых систем измеряли напряжение и ток с подключением внешнего сопротивления в диапазоне от 10 кОм до 50 Ом. Расчет мощности и плотности мощности проводили по уравнениям 2 и 3 соответственно:

$$P = U \times I, \quad (2)$$

$$P_d = \frac{P}{S_a}, \quad (3)$$

где U – напряжение, В; I – сила тока, А; P – мощность, Вт; P_d – плотность мощности, Вт/м²; S_a – геометрическая площадь анода, м².

Внутреннее сопротивление системы определяли по графику зависимости $U = f(I)$, где $\operatorname{tg} \alpha = R_{\text{int}}$ согласно закону Ома.

1.5. Исследование структуры биоанодов РМТЭ методом сканирующей электронной микроскопии. Для изучения структуры биоанодов РМТЭ проводили фиксацию биоматериала в парах глутарового альдегида ($\omega = 50 \%$) и тетраоксида осмия с последующим высушиванием при 35 °С в течение суток. Образцы наносили на графитовый скотч, закрепляли на металлическом диске – объектодержателе. На поверхность образцов напыляли золото в течении 10 мин в вакуумно-напылительной установке FINE COAT JFC-1100 (JEOL, Япония). Анализ образцов проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-6510 LV (JEOL, Япония) в условиях низкого вакуума (30 Па) в режиме регистрации вторичных электронов.

1.6. Статистическая обработка результатов. Все измерения проводили в трех повторностях, для РМТЭ – в двух. Результаты представляли как среднее значение и доверительный интервал (если не указано иное). Статистическую обработку данных осуществляли с помощью программного пакета Excel (Microsoft Corp., США).

2. Результаты и их обсуждение

2.1. Исследование модифицированных углеродных материалов методом спектроскопии комбинационного рассеяния. Углеродный войлок до (контрольный образец) и после электроосаждения MnO_2 (ЭОс-MnO_2) охарактеризован с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния (рис. 3, а), оптической микроскопии (рис. 3, б–г) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (рис. 4).

В спектре исходного углеродного войлока присутствуют полосы комбинационного рассеяния, характерные для углеродных материалов: полоса G ($\sim 1550 \text{ см}^{-1}$), возникающая вследствие колебаний связей между sp^2 -гибридными атомами углерода [37], и связанная с наличием дефектов в кристаллической решетке полоса D ($\sim 1350 \text{ см}^{-1}$), интенсивность которой прямо пропорциональна их числу в образце [37]. При электрохимической модификации поверхности войлока снижается интенсивность полос углеродных материалов и возникает полоса, соответствующая диоксиду марганца. Это связано с постепенным покрытием поверхности волокон углеродного войлока слоем MnO_2 , что подтверждается данными оптической микроскопии (рис. 3, б–г) и энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, данные которой свидетельствуют о присутствии марганца на поверхности углеродного материала (рис. 4). Форма и положение ($550\text{--}650 \text{ см}^{-1}$) новой полосы комбинационного рассеяния позволяют считать, что MnO_2 представлен главным образом α -формой [42], которая проявляет наивысшую электрокаталитическую активность по отношению к реакции восстановления кислорода [43].

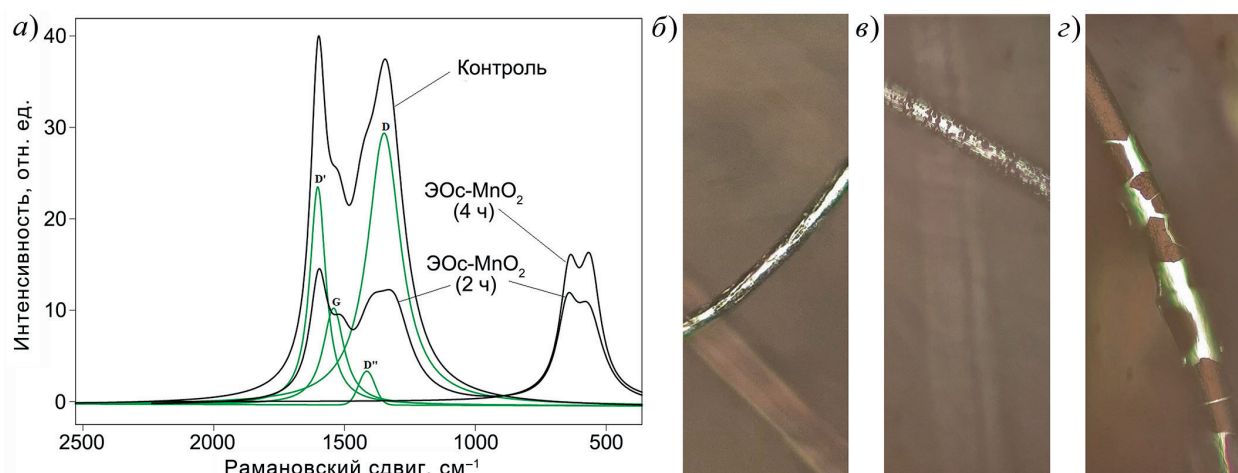


Рис. 3. Спектры комбинационного рассеяния углеродного войлока до (контроль) и после электроосаждения MnO_2 (ЭОс- MnO_2) (a). Поверхность углеродного войлока до (б) и после электроосаждения MnO_2 в течение 2 ч (в) и 4 ч (г) по данным оптической микроскопии (увеличение 500 $\times$)

Fig. 3. Raman spectra of carbon felt before (control) and after MnO_2 electrodeposition (ED- MnO_2) (a). Surface of carbon felt before (b) and after MnO_2 electrodeposition for 2 h (c) and 4 h (d) based on optical microscopy data (magnification 500 $\times$)

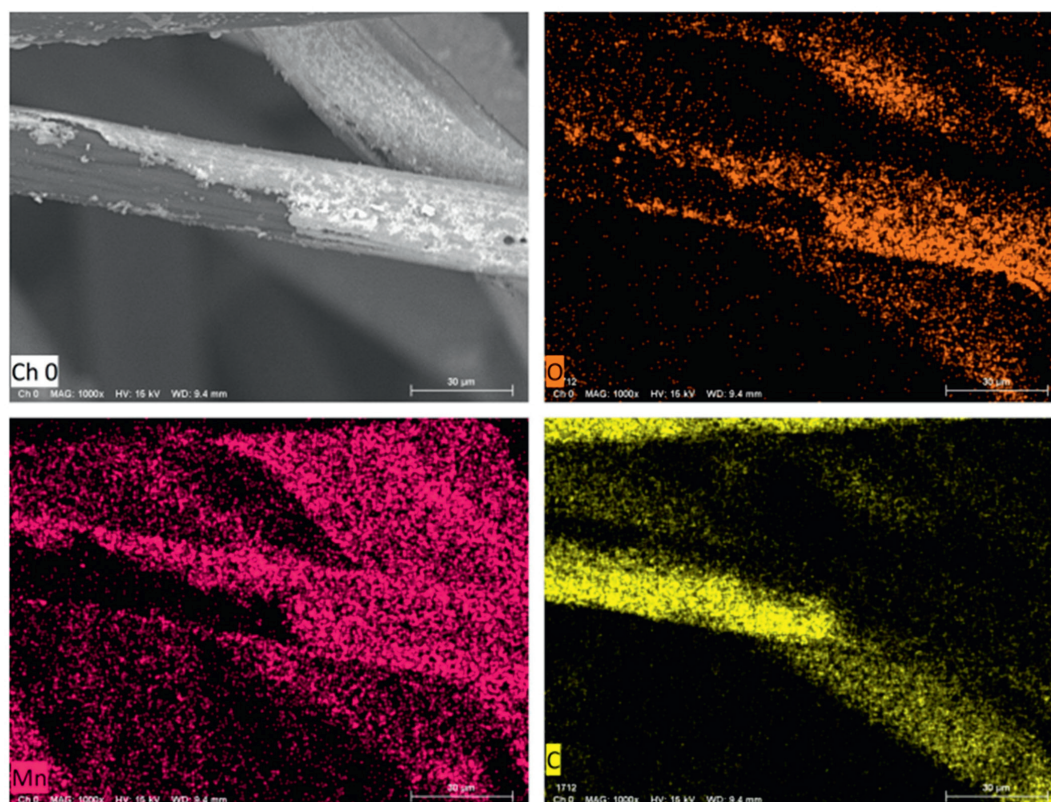


Рис. 4. Элементный состав поверхности углеродного войлока, модифицированного электроосажденным MnO_2

Fig. 4. Elemental composition of the surface of carbon felt modified with electrodeposited MnO_2

Для интерпретации спектров проведен деконволюционный анализ полос комбинационного рассеяния согласно известному алгоритму [38]. Это позволило выделить дополнительные полосы D' (связана с типом дефектов [39, 40]) и D'' (связана с содержанием

аморфной фазы [41]) в образцах углеродного войлока. Сопоставление интенсивностей полос поглощения проводили после их нормирования на интенсивность полосы G, так как в процессе модификации поверхности углеродного войлока общее содержание связей между sp^2 -гибридными атомами углерода меняется незначительно. Результаты представлены в таблице 1.

Табл. 1. Типы и количественные характеристики дефектов структуры рассматриваемых электродов
Table 1. Types and quantitative characteristics of structural defects in the studied electrodes

Анод	I_D/I_G	$I_{D'}/I_G$	$I_D/I_{D'}$	Тип дефекта
Контроль	1.6 ± 0.1	0.7 ± 0.1	1.0 ± 0.2	sp^3
ЭОс- MnO_2 2 ч	1.7 ± 0.2	0.81 ± 0.04	1.0 ± 0.1	sp^3
ЭОс- MnO_2 4 ч	—	—	—	—

Электроосаждение MnO_2 не привело к изменению соотношений интенсивностей полос комбинационного рассеяния. Это свидетельствует о том, что в процессе модификации электрода в углеродном материале количество дефектов I_D/I_G , аморфной фазы $I_{D'}/I_G$, а также дефектов $I_D/I_{D'}$ не меняется. По величине соотношения $I_D/I_{D'}$ можно сделать вывод, что основной тип дефектов в структуре углеродного войлока представлен sp^3 -гибридными атомами углерода.

2.2. Электрохимические измерения. Электроактивную площадь поверхности и сопротивление переносу заряда в системе ферро-/феррицианид-ионы для исходного и модифицированного войлока определяли методами циклической вольтамперометрии и электрохимической импедансной спектроскопии (рис. 5).

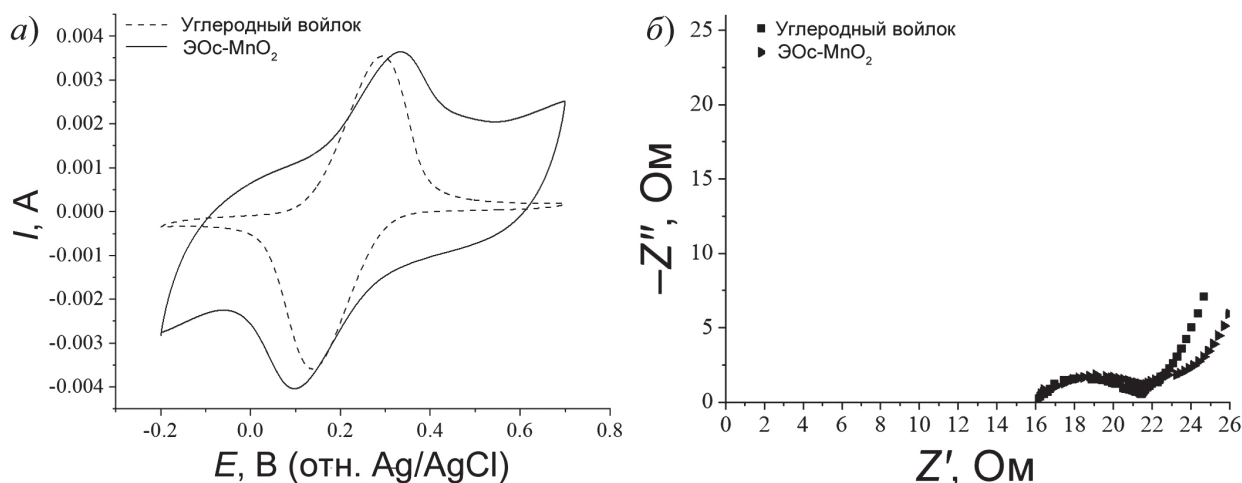


Рис. 5. Электрохимические испытания исходного углеродного войлока и образца с осажденным MnO_2 : вольтамперограммы образцов углеродного войлока в присутствии 2.5 мМ $K_3[Fe(CN)_6]$ в 0.1 М KCl, $\nu = 10$ мВ/с (а); диаграммы Найквиста для образцов углеродного войлока в присутствии 2.5 мМ $K_3[Fe(CN)_6]$ в 0.1 М KCl (б)

Fig. 5. Electrochemical tests for the control carbon felt and the sample with deposited MnO_2 : voltammograms of the carbon felt samples in the presence of 2.5 mM $K_3[Fe(CN)_6]$ in 0.1 M KCl, $\nu = 10$ mV/s (a); Nyquist plots for the carbon felt samples in the presence of 2.5 mM $K_3[Fe(CN)_6]$ in 0.1 M KCl (b)

Рассчитанные параметры электродов представлены в табл. 2. Модификация электрода приводит к 1.5-кратному увеличению его электроактивной площади по сравнению с исходным углеродным войлоком, что, вероятно, обусловлено псевдоемкостными характе-

ристиками MnO_2 [44]. После модификации разность потенциалов редокс-пигов (ΔE) увеличивается на 80 мВ, что косвенно может указывать на уменьшение скорости электрохимической реакции [45]. Тем не менее, сопротивление переносу заряда (R_{ct}) не изменяется. При этом в работах [45–49] отмечается снижение сопротивления переносу заряда (R_{ct}) при использовании композитных материалов, содержащих в составе MnO_2 , что говорит о возможности использования MnO_2 в качестве анодного катализатора.

Табл. 2. Электрохимические параметры модифицированных электродов

Table 2. Electrochemical parameters of the modified electrodes

Электрод	S , $\text{m}^2/\text{г}$	ΔE , мВ	R_{ct} , Ом	R_s , Ом
Исходный углеродный войлок	0.05 ± 0.01	140 ± 20	6 ± 1	13 ± 2
ЭОс- MnO_2	0.08 ± 0.02	220 ± 20	6 ± 2	14 ± 3

2.3. Влияние модификации электродов на электрогенерацию в РМТЭ. По экспериментальным данным РМТЭ построены зависимости потенциала разомкнутой цепи от времени функционирования и поляризационные кривые, по тангенсу угла наклона которых установлено внутреннее сопротивление (R_{int}) РМТЭ.

Динамика электрогенерации РМТЭ с модифицированными электродами на основе бактерий *Ps. chlororaphis* представлена на рис. 6. В качестве контрольной системы использовали аноды, смоченные в 4 М растворе HCl .

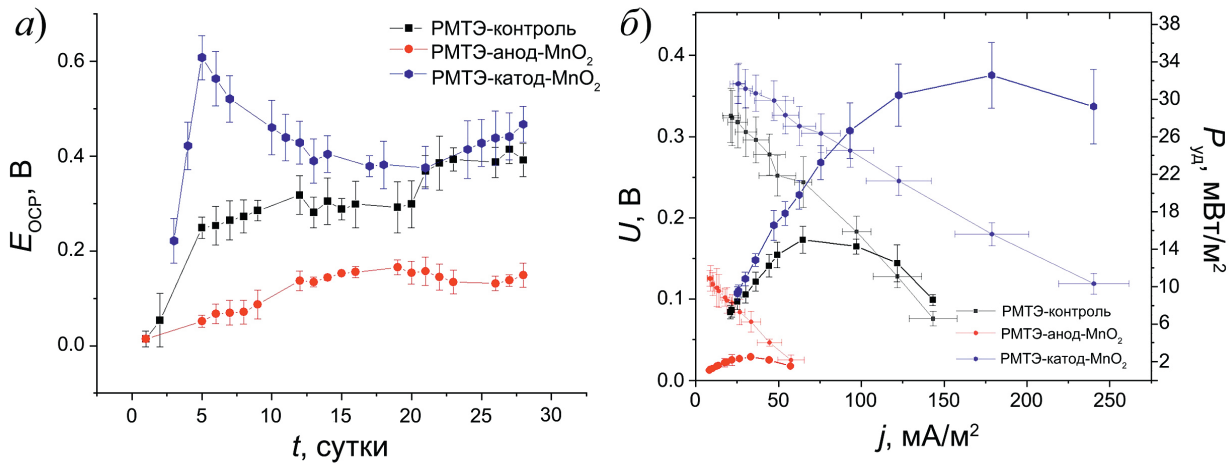


Рис. 6. Динамики генерации РМТЭ: изменение потенциала разомкнутой цепи (E_{OCP}) во времени (а), поляризационные кривые для расчета сопротивления и кривая мощности исследуемых систем (б)

Fig. 6. Generation dynamics of PMFC: changes in open circuit potential (E_{OCP}) over time (a), polarization curves for resistance calculation and power curve of the studied systems (b)

В первый день функционирования РМТЭ наблюдаются низкие значения силы тока ($I_{кз}$) и потенциала (E_{OCP}), которые возрастают в течение 10 дней. Этот промежуток времени можно обозначить как период адаптации микроорганизмов к условиям РМТЭ [50]. С 10-го по 28-й день E_{OCP} и $I_{кз}$ выходят на стационарные (постоянные) значения. Период адаптации характерен для РМТЭ и может составлять до 30 сут [51, 52]. Так, в работе [53] РМТЭ на основе растения *Cyperus papyrus* эксплуатировали в лабораторных условиях в течение девяти сот дней, при этом выход на постоянные значения напряжения (при нагрузке 1 кОм) наблюдали на 30-й день эксперимента. Авторы указывают на потерю мощности при длительных сроках эксплуатации РМТЭ, что может быть обусловлено накоплением биомассы или уменьше-

ем экссудации растений, зависящей от стадии роста. Как видно из рис. 6, наибольшим значением $I_{\text{кз}}$ на протяжении всего времени функционирования обладает РМТЭ-катод- MnO_2 .

В табл. 3 представлены электрохимические характеристики разработанных РМТЭ и описанных в литературе микробных топливных элементов на основе биоанодов.

Табл. 3. Электрохимические характеристики ячеек РМТЭ

Table 3. Electrochemical characteristics of the PMFC cells

Биоэлектрохимическая система	$E_{\text{оср}}$, В	$I_{\text{кз}}$, мА	R , Ом	$P_{\text{уд}}$, мВт/м ²	Литература
РМТЭ-Контроль	0.45 ± 0.04	1.06 ± 0.09	450 ± 30	15 ± 3	Эта работа
РМТЭ-катод- MnO_2	0.62 ± 0.04	3.6 ± 0.4	240 ± 20	33 ± 3	
РМТЭ-анод- MnO_2	0.17 ± 0.02	0.39 ± 0.08	430 ± 30	2 ± 1	
МТЭ-полипиррол/ MnO_2	0.64	—	—	440	[30]
МТЭ-полианилин/ MnO_2	0.77	—	155.6	248	[54]
МТЭ- MnO_2 /восстановленный оксид графена	0.595	—	—	1.59 Вт/м ³	[55]

Наименьшими электрохимическими характеристиками (сила тока, напряжение, мощность) по сравнению с контрольной системой обладает РМТЭ с модифицированным анодом (РМТЭ-анод- MnO_2). Электроосаждение MnO_2 на анод системы РМТЭ привело к 7-кратному снижению ее мощности. Измеренные потенциалы анода на 28-й день эксперимента также указывают на низкую активность микроорганизмов на аноде и составляют 40 мВ для РМТЭ- MnO_2 и –240 мВ для РМТЭ-контроль, что, вероятно, связано с восстановлением MnO_2 до Mn(II) бактериями *Pseudomonas* sp. с помощью соединений феназинового ряда [56–58]. В работе [59] отмечено, что MnO_2 способствует прямому переносу электронов от микроорганизмов к поверхности анода. Данный подход, по-видимому, не может быть реализован в случае используемых бактерий *Ps. chlororaphis* вследствие преобладания медиаторного переноса за счет соединений феназинового ряда (рис. 7).

Внутреннее сопротивление исследуемых РМТЭ-контроль и РМТЭ-анод- MnO_2 с учетом доверительных интервалов изменяется незначительно, поэтому вклад модифицированного анода в R_{int} оценить затруднительно. Однако для РМТЭ-катод- MnO_2 наблюдается снижение R_{int} , что может быть обусловлено уменьшением перенапряжения реакции восстановления кислорода на катоде. В целом, учитывая линейный характер поляризационных кривых, в системах РМТЭ преобладают омические потери, связанные с переносом заряда через электролит.

Тем не менее мощность исследуемых РМТЭ ниже по сравнению с другими микробными топливными элементами [30, 54] (табл. 3), что обусловлено различными условиями эксперимента. Например, в работе [30] использовали анод из нержавеющей стали с электрохимически осажденным полипирролом и MnO_2 , обеспечивающий двукратное увеличение мощности по сравнению с анодом из нержавеющей стали. Более высокая мощность микробных топливных элементов [30, 54] относительно разработанных РМТЭ может быть обусловлена использованием дополнительных источников субстрата, анаэробными условиями в анодной зоне, аэрацией катодной камеры [30, 54] и использованием активного ила [54]. Таким образом, адекватное сопоставление характеристик биоэлектрохимических систем является затруднительным.

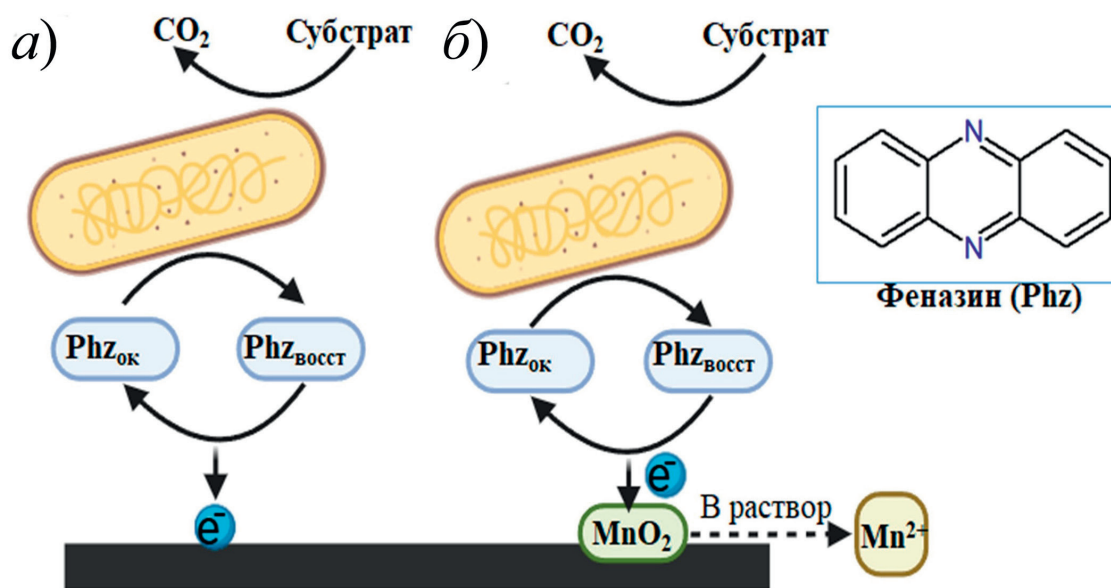


Рис. 7. Предполагаемая схема функционирования микроорганизмов на аноде в РМТЭ-контроль (а) и РМТЭ-анод-MnO₂ (б)

Fig. 7. Proposed scheme for microorganism functioning at the anode in PMFC-control (a) and PMFC-anode-MnO₂ (b)

2.4. Сканирующая электронная микроскопия углеродных биоанодов. После эксплуатации РМТЭ в течение 28 дней проводили оценку поверхности анодов методом сканирующей электронной микроскопии (рис. 8) с целью выявления формирования биопленки на поверхности электродов. На анодах наблюдаются покрытия из полимероподобной субстанции в РМТЭ-контроль и РМТЭ-анод-MnO₂, (рис. 8, б и в соответственно). Однако значение потенциала анода в РМТЭ-MnO₂ является минимальным по сравнению с контрольным РМТЭ, что может быть обусловлено восстановлением MnO₂ до Mn(II) соединениями феназинового ряда [56–58] без накопления электронов на поверхности анода (рис. 7, б).

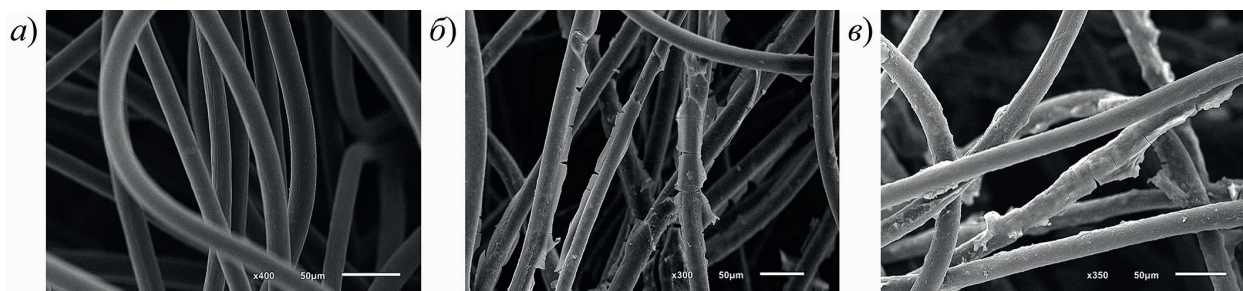


Рис. 8. Поверхность анодов из углеродного войлока (а), РМТЭ-контроль (б) и РМТЭ-анод-MnO₂ (в) по данным сканирующей электронной микроскопии. Увеличение 400× (а), 300× (б) и 350× (в)

Fig. 8. Surface of carbon felt anodes (a), PMFC-control (b), and PMFC-anode-MnO₂ (c) based on scanning electron microscopy data. Magnification 400× (a), 300× (b), and 350× (c)

Заключение

Продемонстрирована возможность использования модифицированного углеродного войлока с большой геометрической площадью в РМТЭ. Установлено, что система РМТЭ-анод-MnO₂ характеризуется меньшей мощностью ($P_{y\partial} = 2$ мВт/м²) по сравнению с контрольной системой, что обусловлено восстановлением MnO₂ на поверхности анода. Ис-

пользование MnO_2 на катоде показало двукратное увеличение мощности и снижение внутреннего сопротивления с 450 до 240 Ом, что подтверждает возможность использования электроосажденного MnO_2 в качестве недорогого и эффективного катодного катализатора реакции восстановления кислорода в РМТЭ с возможностью его масштабирования на электродах с большой площадью.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflicts of Interest. The authors declare no conflicts of interest.

Литература

1. Machol B., Rizk S. Economic value of U.S. fossil fuel electricity health impacts // *Environ. Int.* 2013. V. 52. P. 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.03.003>.
2. Abdelkareem M.A., Elsaid K., Wilberforce T., Kamil M., Sayed E.T., Olabi A. Environmental aspects of fuel cells: A review // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 752. Art. 141803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141803>.
3. Sonawane A.V., Rikame S., Sonawane S.H., Gaikwad M., Bhanvase B., Sonawane S.S., Mungray A.K., Gaikwad R. A review of microbial fuel cell and its diversification in the development of green energy technology // *Chemosphere.* 2024. V. 350. Art. 141127. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141127>.
4. Rabaey K., Verstraete W. Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation // *Trends Biotechnol.* 2005. V. 23, No 6. P. 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008>.
5. Pamintuan K.R.S., Sanchez K.M. Power generation in a plant-microbial fuel cell assembly with graphite and stainless steel electrodes growing *Vigna Radiata* // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. V. 703, No 1. Art. 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/703/1/012037>.
6. Al-Badani M., Chong P.L., Lim H.S. A mini review of the effect of modified carbon paper, carbon felt, and carbon cloth electrodes on the performance of microbial fuel cell // *Int. J. Green Energy.* 2024. V. 21, No 1. P. 170–186. <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2194979>.
7. Azri Y.M., Tou I., Sadi M. Electrodes materials evaluation in plant microbial fuel cells: A comparison of graphite and stainless steels // *Biofuels.* 2023. V. 14, No 10. P. 1077–1086. <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2212987>.
8. Zhang C., Zeng X., Xu X., Nie W., Dubey B.K., Ding W. PDA- Fe_3O_4 decorated carbon felt anode enhancing electrochemical performance of microbial fuel cells: Effect of electrode materials on electroactive bio-film // *Chemosphere.* 2024. V. 355. Art. 141764. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141764>.
9. Agüero-Quiñones R., Ávila-Sánchez Z., Rojas-Flores S., Cabanillas-Chirinos L., De La Cruz-Noriega M., Nazario-Naveda R., Rojas-Villacorta W. Activated carbon electrodes for bioenergy production in microbial fuel cells using synthetic wastewater as substrate // *Sustainability.* 2023. V. 15, No 18. Art. 13767. <https://doi.org/10.3390/su151813767>.
10. Zou J., Chang Q., Guo C., Yan M. Vanadium nitride decorated carbon cloth anode promotes aniline degradation and electricity generation of MFCs by efficiently enriching electroactive bacteria and promoting extracellular electron transfer // *J. Environ. Manage.* 2023. V. 346. Art. 119048. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119048>.
11. Zhu K., Wang S., Liu H., Liu S., Zhang J., Yuan J., Fu W., Dang W., Xu Y., Yang X., Wang Z. Heteroatom-doped porous carbon nanoparticle-decorated carbon cloth (HPCN/CC) as efficient anode electrode for microbial fuel cells (MFCs) // *J. Cleaner Prod.* 2022. V. 336. Art. 130374. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130374>.
12. Chen L., Jiang L., Cheng L., Gao Y., Wang M., Xu L., Zhu Z. Kinetic study of electron transfer process in methyl orange decolorization by *Shewanella* in MFCs with covalent organic frameworks modified anode // *Chemosphere.* 2024. V. 350. Art. 141073. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141073>.

13. *Hidalgo D., Tommasi T., Bocchini S., Chiolerio A., Chiodoni A., Mazzarino I., Ruggeri B.* Surface modification of commercial carbon felt used as anode for microbial fuel cells // *Energy*. 2016. V. 99. P. 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.039>.
14. *Yang J., Zhao Y.-G., Liu X., Fu Y.* Anode modification of sediment microbial fuel cells (SMFC) towards bioremediating mariculture wastewater // *Mar. Pollut. Bull.* 2022. V. 182. Art. 114013. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114013>.
15. *Huang X., Ma G.* Graphite felt modified-graphene oxide/graphene as novel vanadium battery electrode material // *Ferroelectrics*. 2021. V. 579, No 1. P. 12–22. <https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1903263>.
16. *Zheng X., Hou S., Amanze C., Zeng Z., Zeng W.* Enhancing microbial fuel cell performance using anode modified with Fe₃O₄ nanoparticles // *Bioprocess Biosyst. Eng.* 2022. V. 45, No 5. P. 877–890. <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02705-z>.
17. *Mumtaz M.W., Mukhtar H., Miran W., Alessa A.H., Waleed A., Sarwar Z., Ashraf H.* Impact of CeO₂ modified cathode and PANI modified anode on tannery wastewater fed microbial fuel cell performance // *Saudi J. Biol. Sci.* 2024. V. 31, No 8. Art. 104024. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2024.104024>.
18. *Liu X., Zhao X., Yu Y.-Y., Wang Y.-Z., Shi Y.-T., Cheng Q.-W., Fang Z., Yong Y.-C.* Facile fabrication of conductive polyaniline nanoflower modified electrode and its application for microbial energy harvesting // *Electrochim. Acta*. 2017. V. 255. P. 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.09.153>.
19. *Yoon C.-M., Long D., Jang S.-M., Qiao W., Ling L., Miyawaki J., Rhee C.-K., Mochida I., Yoon S.-H.* Electrochemical surface oxidation of carbon nanofibers // *Carbon*. 2011. V. 49, No 1. P. 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.08.047>.
20. *Zhang W., Xie B., Yang L., Liang D., Zhu Y., Liu H.* Brush-like polyaniline nanoarray modified anode for improvement of power output in microbial fuel cell // *Bioresour. Technol.* 2017. V. 233. P. 291–295. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.124>.
21. *Zhou M., Chi M., Wang H., Jin T.* Anode modification by electrochemical oxidation: A new practical method to improve the performance of microbial fuel cells // *Biochem. Eng. J.* 2012. V. 60. P. 151–155. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.10.014>.
22. *Luo J., Chi M., Wang H., He H., Zhou M.* Electrochemical surface modification of carbon mesh anode to improve the performance of air-cathode microbial fuel cells // *Bioprocess Biosyst. Eng.* 2013. V. 36, No 12. P. 1889–1896. <https://doi.org/10.1007/s00449-013-0963-x>.
23. *Hirose S., Takasugi K., Nakamoto T., Taguchi K.* Cobalt-intercalated birnessite-type manganese oxide catalysts for low-cost cathodes in microbial fuel cells // *Resourceedings*. 2023. V. 3, No 3. P. 17–22. <https://doi.org/10.21625/resourceedings.v3i3.1025>.
24. *Chen J., Zhao K., Wu Y., Liu J., Wang R., Yang Y., Liu Y.* Improved bioelectrochemical performance of MnO₂ nanorods modified cathode in microbial fuel cell // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023. V. 30, No 17. P. 49052–49059. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25787-y>.
25. *Wang Y., Hu G., Zheng D., Dong J., Wang J.* High-capacitance manganese dioxide oxide/carbon nanotube/carbon felt as a bioanode for enhanced energy output in microbial fuel cells // *Coatings*. 2023. V. 13, No 6. Art. 1043. <https://doi.org/10.3390/coatings13061043>.
26. *Ravinuthala S., Anilbhai B.V., Settu S.* Fabrication of low-cost, green material-based microbial fuel cell for bioelectricity production through textile wastewater remediation // *Mater. Today: Proc.* 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.528>.
27. *Majidi M.R., Farahani F.S., Hosseini M., Ahadzadeh I.* Low-cost nanowired α-MnO₂/C as an ORR catalyst in air-cathode microbial fuel cell // *Bioelectrochemistry*. 2019. V. 125. P. 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2018.09.004>.
28. *Xu Q., Wang J.-M., Cheng X.-L., Jiang Y.-Q., Tian R.-R., Fu H., Ji Y.-X., Zhou J., Ji G.-S., Yong X.-Y.* Electricity generation and energy storage in microbial fuel cells with manganese dioxide capacitive electrode // *J. Power Sources*. 2024. V. 598. Art. 234192. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234192>.
29. *Zhang C., Liang P., Jiang Y., Huang X.* Enhanced power generation of microbial fuel cell using manganese dioxide-coated anode in flow-through mode // *J. Power Sources*. 2015. V. 273. P. 580–583. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.129>.

30. Phonsa S., Sreearunothai P., Charojrochkul S., Sombatmankhong K. Electrodeposition of MnO_2 on polypyrrole-coated stainless steel to enhance electrochemical activities in microbial fuel cells // *Solid State Ionics*. 2018. V. 316. P. 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2017.11.022>.
31. Yu S., Liu Y., Zhao Y., Khan R., Cao X., Li C. CNFs@ MnO_2 nanofiber as anode material for improving the extracellular electron transfer of microbial fuel cells // *Catal. Sci. Technol.* 2024. V. 14, No 2. P. 464–477. <https://doi.org/10.1039/D3CY01510F>.
32. Zhang C., Liang P., Yang X., Jiang Y., Bian Y., Chen C., Zhang X., Huang X. Binder-free graphene and manganese oxide coated carbon felt anode for high-performance microbial fuel cell // *Biosens. Bioelectron.* 2016. V. 81. P. 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.02.051>.
33. ГОСТ 32426-2013 Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Испытание ряски на угнетение роста. М.: Стандартинформ, 2019. 20 с.
34. Юшин Ю.В., Подкопайло Р.В., Петрова Д.А., Егоров К.А., Трухин В.П. Обзор питательных сред, используемых для культивации рекомбинантной *Escherichia coli* // *Медицина экстремальных ситуаций*. 2019. Т. 21, № 3. С. 444–453.
35. Земскова Л.А., Войт А.В., Баринов Н.Н., Кайдалова Т.А. Функциональные материалы на основе диоксида марганца, нанесенного на углеродное волокно // *Физика и химия стекла*. 2014. Т. 40, № 1. С. 3–10.
36. Yong X.-Y., Gu D.-Y., Wu Y.-D., Yan Z.-Y., Zhou J., Wu X.-Y., Wei P., Jia H.-H., Zheng T., Yong Y.-C. Bio-Electron-Fenton (BEF) process driven by microbial fuel cells for triphenyltin chloride (TPTC) degradation // *J. Hazard. Mater.* 2017. V. 324. Pt. B. P. 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.047>.
37. Hodkiewicz J. Characterizing graphene with Raman spectroscopy // *Thermo-Fisher Scientific Application Note*. 2010. 3 p.
38. Bonpua J., Yagües Y., Aleshin A., Disappa S., Camacho J. Flame temperature effect on sp^2 bonds on nascent carbon nanoparticles formed in premixed flames ($T_{f,max} > 2100$ K): A Raman spectroscopy and particle mobility sizing study // *Proc. Combust. Inst.* 2019. V. 37, No 1. P. 943–951. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.124>.
39. Armano A., Agnello S. Two-dimensional carbon: A review of synthesis methods, and electronic, optical, and vibrational properties of single-layer graphene // *C*. 2019. V. 5, No 4. Art. 67. <https://doi.org/10.3390/c5040067>.
40. Eckmann A., Felten A., Mishchenko A., Britnell L., Krupke R., Novoselov K.S., Casiraghi C. Probing the nature of defects in graphene by Raman spectroscopy // *Nano Lett.* 2012. V. 12, No 8. P. 3925–3930. <https://doi.org/10.1021/nl300901a>.
41. Lübke M., Sumboja A., McCafferty L., Armer C.F., Handoko A.D., Du Y., McColl K., Cora F., Brett D., Liu Zh., Darr J.A. Transition-metal-doped $\alpha\text{-MnO}_2$ nanorods as bifunctional catalysts for efficient oxygen reduction and evolution reactions // *ChemistrySelect*. 2018. V. 3, No 9. P. 2613–2622. <https://doi.org/10.1002/slct.201702514>.
42. Julien C., Massot M., Rangan S., Lemal M., Guyomard D. Study of structural defects in $\gamma\text{-MnO}_2$ by Raman spectroscopy // *J. Raman Spectrosc.* 2002. V. 33, No 4. P. 223–228. <https://doi.org/10.1002/jrs.838>.
43. Langner J., Bruns M., Dixon D., Nefedov A., Wöll Ch., Scheiba F., Ehrenberg H., Roth C., Melke J. Surface properties and graphitization of polyacrylonitrile based fiber electrodes affecting the negative half-cell reaction in vanadium redox flow batteries // *J. Power Sources*. 2016. V. 321. P. 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.128>.
44. Ataherian F., Lee K.-T., Wu N.-L. Long-term electrochemical behaviors of manganese oxide aqueous electrochemical capacitor under reducing potentials // *Electrochim. Acta*. 2010. V. 55, No 25. P. 7429–7435. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.01.102>.
45. Ouda E., Yousf N., Magar H.S., Hassan R.Y.A., Duraia E.-S.M. Electrochemical properties of MnO_2 -based carbon nanomaterials for energy storage and electrochemical sensing // *J. Mater. Sci: Mater. Electron.* 2023. V. 34, No 8. Art. 731. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10107-4>.

46. Yang L., Wang A., Wen Q., Chen Y. Modified cobalt-manganese oxide-coated carbon felt anodes: An available method to improve the performance of microbial fuel cells // *Bioprocess Biosyst. Eng.* 2021. V. 44, No 12. P. 2615–2625. <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02631-6>.
47. Yuan H., Deng L., Chen Y., Yuan Y. MnO₂/polypyrrole/MnO₂ multi-walled-nanotube-modified anode for high-performance microbial fuel cells // *Electrochim. Acta.* 2016. V. 196. P. 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.02.183>.
48. Mishra P., Jain R. Electrochemical deposition of MWCNT-MnO₂/PPy nanocomposite application for microbial fuel cells // *Int. J. Hydrogen Energy.* 2016. V. 41, No 47. P. 22394–22405. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.020>.
49. Gnana Kumar G., Awan Z., Nahm K.S., Xavier J.S. Nanotubular MnO₂/graphene oxide composites for the application of open air-breathing cathode microbial fuel cells // *Biosens. Bioelectron.* 2014. V. 53. P. 528–534. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.10.012>.
50. Bataillou G., Haddour N., Vollaie C. Bioelectricity production of PMFC using *Lobelia Queen Cardinalis* in individual and shared soil configurations // *E3S Web Conf.* 2022. V. 334. Art. 08001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233408001>.
51. Sarma P.J., Mohanty K. Development and comprehensive characterization of low-cost hybrid clay based ceramic membrane for power enhancement in plant based microbial fuel cells (PMFCs) // *Mater. Chem. Phys.* 2023. V. 296. Art. 127337. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127337>.
52. Sarma P.J., Mohanty K. A novel three-chamber modular PMFC with bentonite/flyash based clay membrane and oxygen reducing biocathode for long term sustainable bioelectricity generation // *Bioelectrochemistry.* 2022. V. 144. Art. 107996. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2021.107996>.
53. Bataillou G., Ondel O., Haddour N. 900-Days long term study of plant microbial fuel cells and complete application for powering wireless sensors // *J. Power Sources.* 2024. V. 593. Art. 233965. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233965>.
54. Zhou X., Xu Y., Mei X., Du N., Jv R., Hu Z., Chen S. Polyaniline/ β -MnO₂ nanocomposites as cathode electrocatalyst for oxygen reduction reaction in microbial fuel cells // *Chemosphere.* 2018. V. 198. P. 482–491. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.058>.
55. Zhang H., Wu Y., Zhong C., Wang G., Wang B., Ma C., Zhang H., Ding C., Liu Y., Kong C., Yang Z., Wang T., Zhu H. MnO₂@rGO modified stainless steel mesh as cathode membrane in MFC-MBR for enhanced bioelectricity generation and membrane fouling mitigation // *J. Water Process Eng.* 2024. V. 66. Art. 106111. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106111>.
56. Ntyam Mendo S.A., Kouitcheu Mabeku L.B., Tounkara L.S., Nguemezi S.T., Ngane R.A.N., Sameza L.M. Abiotic conditions on growth of *Pseudomonas fluorescens* (DS17R) and its ability to produce secondary metabolites (including phenazines) against *Phytophthora colocasiae*, the causal agent of taro leaf blight // *Austin J. Biotechnol. Bioeng.* 2018. V. 5, No 2. Art. 1095.
57. Mavrodi D.V., Blankenfeldt W., Thomashow L.S. Phenazine compounds in fluorescent *Pseudomonas* spp. biosynthesis and regulation // *Annu. Rev. Phytopathol.* 2006. V. 44. P. 417–445. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.013106.145710>.
58. Horvath A.S., Garrick L.V., Moreau J.W. Manganese-reducing *Pseudomonas fluorescens*-group bacteria control arsenic mobility in gold mining-contaminated groundwater // *Environ. Earth Sci.* 2014. V. 71, No 9. P. 4187–4198. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2809-x>.
59. Fu Y., Yu J., Zhang Y., Meng Y. Graphite coated with manganese oxide/multiwall carbon nanotubes composites as anodes in marine benthic microbial fuel cells // *Appl. Surf. Sci.* 2014. V. 317. P. 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.044>.
60. Gao C., Liu L., Yu T., Yang F. Development of a novel carbon-based conductive membrane with in-situ formed MnO₂ catalyst for wastewater treatment in bio-electrochemical system (BES) // *J. Membr. Sci.* 2018. V. 549. P. 533–542. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.12.053>.
61. Olias L.G., Otero A.R., Cameron P.J., Di Lorenzo M. A soil microbial fuel cell-based biosensor for dissolved oxygen monitoring in water // *Electrochim. Acta.* 2020. V. 362. Art. 137108. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137108>.

References

1. Machol B., Rizk S. Economic value of U.S. fossil fuel electricity health impacts. *Environ. Int.*, 2013, vol. 52, pp. 75–80. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.03.003>.
2. Abdelkareem M.A., Elsaid K., Wilberforce T., Kamil M., Sayed E.T., Olabi A. Environmental aspects of fuel cells: A review. *Sci. Total Environ.*, 2021, vol. 752, art. 141803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141803>.
3. Sonawane A.V., Rikame S., Sonawane S.H., Gaikwad M., Bhanvase B., Sonawane S.S., Mungray A.K., Gaikwad R. A review of microbial fuel cell and its diversification in the development of green energy technology. *Chemosphere*, 2024, vol. 350, art. 141127. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141127>.
4. Rabaey K., Verstraete W. Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation. *Trends Biotechnol.*, 2005, vol. 23, no. 6, pp. 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.04.008>.
5. Pamintuan K.R.S., Sanchez K.M. Power generation in a plant-microbial fuel cell assembly with graphite and stainless steel electrodes growing *Vigna Radiata*. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 703, no. 1, art. 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/703/1/012037>.
6. Al-Badani M., Chong P.L., Lim H.S. A mini review of the effect of modified carbon paper, carbon felt, and carbon cloth electrodes on the performance of microbial fuel cell. *Int. J. Green Energy*, 2024, vol. 21, no. 1, pp. 170–186. <https://doi.org/10.1080/15435075.2023.2194979>.
7. Azri Y.M., Tou I., Sadi M. Electrodes materials evaluation in plant microbial fuel cells: A comparison of graphite and stainless steels. *Biofuels*, 2023, vol. 14, no. 10, pp. 1077–1086. <https://doi.org/10.1080/17597269.2023.2212987>.
8. Zhang C., Zeng X., Xu X., Nie W., Dubey B.K., Ding W. PDA-Fe₃O₄ decorated carbon felt anode enhancing electrochemical performance of microbial fuel cells: Effect of electrode materials on electroactive biofilm. *Chemosphere*, 2024, vol. 355, art. 141764. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141764>.
9. Agüero-Quiñones R., Ávila-Sánchez Z., Rojas-Flores S., Cabanillas-Chirinos L., De La Cruz-Noriega M.D.L., Nazario-Naveda R., Rojas-Villacorta W. Activated carbon electrodes for bioenergy production in microbial fuel cells using synthetic wastewater as substrate. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 18, art. 13767. <https://doi.org/10.3390/su151813767>.
10. Zou J., Chang Q., Guo C., Yan M. Vanadium nitride decorated carbon cloth anode promotes aniline degradation and electricity generation of MFCs by efficiently enriching electroactive bacteria and promoting extracellular electron transfer. *J. Environ. Manage.*, 2023, vol. 346, art. 119048. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119048>.
11. Zhu K., Wang S., Liu H., Liu S., Zhang J., Yuan J., Fu W., Dang W., Xu Y., Yang X., Wang Z. Heteroatom-doped porous carbon nanoparticle-decorated carbon cloth (HPCN/CC) as efficient anode electrode for microbial fuel cells (MFCs). *J. Cleaner Prod.*, 2022, vol. 336, art. 130374. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130374>.
12. Chen L., Jiang L., Cheng L., Gao Y., Wang M., Xu L., Zhu Z. Kinetic study of electron transfer process in methyl orange decolorization by *Shewanella* in MFCs with covalent organic frameworks modified anode. *Chemosphere*, 2024, vol. 350, art. 141073. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.141073>.
13. Hidalgo D., Tommasi T., Bocchini S., Chiolerio A., Chiodoni A., Mazzarino I., Ruggeri B. Surface modification of commercial carbon felt used as anode for microbial fuel cells. *Energy*, 2016, vol. 99, pp. 193–201. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.01.039>.
14. Yang J., Zhao Y.-G., Liu X., Fu Y. Anode modification of sediment microbial fuel cells (SMFC) towards bioremediating mariculture wastewater. *Mar. Pollut. Bull.*, 2022, vol. 182, art. 114013. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114013>.
15. Huang X., Ma G. Graphite felt modified-graphene oxide/graphene as novel vanadium battery electrode material. *Ferroelectrics*, 2021, vol. 579, no. 1, pp. 12–22. <https://doi.org/10.1080/00150193.2021.1903263>.

16. Zheng X., Hou S., Amanze C., Zeng Z., Zeng W. Enhancing microbial fuel cell performance using anode modified with Fe₃O₄ nanoparticles. *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 2022, vol. 45, no. 5, pp. 877–890. <https://doi.org/10.1007/s00449-022-02705-z>.
17. Mumtaz M.W., Mukhtar H., Miran W., Alessa A.H., Waleed A., Sarwar Z., Ashraf H. Impact of CeO₂ modified cathode and PANI modified anode on tannery wastewater fed microbial fuel cell performance. *Saudi J. Biol. Sci.*, 2024, vol. 31, no. 8, art. 104024. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2024.104024>.
18. Liu X., Zhao X., Yu Y.-Y., Wang Y.-Z., Shi Y.-T., Cheng Q.-W., Fang Z., Yong Y.-C. Facile fabrication of conductive polyaniline nanoflower modified electrode and its application for microbial energy harvesting. *Electrochim. Acta*, 2017, vol. 255, pp. 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.09.153>.
19. Yoon C.-M., Long D., Jang S.-M., Qiao W., Ling L., Miyawaki J., Rhee C.-K., Mochida I., Yoon S.-H. Electrochemical surface oxidation of carbon nanofibers. *Carbon*, 2011, vol. 49, no. 1, pp. 96–105. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2010.08.047>.
20. Zhang W., Xie B., Yang L., Liang D., Zhu Y., Liu H. Brush-like polyaniline nanoarray modified anode for improvement of power output in microbial fuel cell. *Bioresour. Technol.*, 2017, vol. 233, pp. 291–295. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.02.124>.
21. Zhou M., Chi M., Wang H., Jin T. Anode modification by electrochemical oxidation: A new practical method to improve the performance of microbial fuel cells. *Biochem. Eng. J.*, 2012, vol. 60, pp. 151–155. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2011.10.014>.
22. Luo J., Chi M., Wang H., He H., Zhou M. Electrochemical surface modification of carbon mesh anode to improve the performance of air-cathode microbial fuel cells. *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 2013, vol. 36, no. 12, pp. 1889–1896. <https://doi.org/10.1007/s00449-013-0963-x>.
23. Hirose S., Takasugi K., Nakamoto T., Taguchi K. Cobalt-intercalated birnessite-type manganese oxide catalysts for low-cost cathodes in microbial fuel cells. *Resourceedings*, 2023, vol. 3, no. 3, pp. 17–22. <https://doi.org/10.21625/resourceedings.v3i3.1025>.
24. Chen J., Zhao K., Wu Y., Liu J., Wang R., Yang Y., Liu Y. Improved bioelectrochemical performance of MnO₂ nanorods modified cathode in microbial fuel cell. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2023, vol. 30, no. 17, pp. 49052–49059. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25787-y>.
25. Wang Y., Hu G., Zheng D., Dong J., Wang J. High-capacitance manganese dioxide oxide/carbon nanotube/carbon felt as a bioanode for enhanced energy output in microbial fuel cells. *Coatings*, 2023, vol. 13, no. 6, art. 1043. <https://doi.org/10.3390/coatings13061043>.
26. Ravinuthala S., Anilbhai B.V., Settu S. Fabrication of low-cost, green material-based microbial fuel cell for bioelectricity production through textile wastewater remediation. *Mater. Today: Proc.*, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.528>.
27. Majidi M.R., Farahani F.S., Hosseini M., Ahadzadeh I. Low-cost nanowired α-MnO₂/C as an ORR catalyst in air-cathode microbial fuel cell. *Bioelectrochemistry*, 2019, vol. 125, pp. 38–45. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2018.09.004>.
28. Xu Q., Wang J.-M., Cheng X.-L., Jiang Y.-Q., Tian R.-R., Fu H., Ji Y.-X., Zhou J., Ji G.-S., Yong X.-Y. Electricity generation and energy storage in microbial fuel cells with manganese dioxide capacitive electrode. *J. Power Sources*, 2024, vol. 598, art. 234192. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2024.234192>.
29. Zhang C., Liang P., Jiang Y., Huang X. Enhanced power generation of microbial fuel cell using manganese dioxide-coated anode in flow-through mode. *J. Power Sources*, 2015, vol. 273, pp. 580–583. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.09.129>.
30. Phonsa S., Sreearunothai P., Charojrochkul S., Sombatmankhong K. Electrodeposition of MnO₂ on polypyrrole-coated stainless steel to enhance electrochemical activities in microbial fuel cells. *Solid State Ionics*, 2018, vol. 316, pp. 125–134. <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2017.11.022>.
31. Yu S., Liu Y., Zhao Y., Khan R., Cao X., Li C. CNFs@MnO₂ nanofiber as anode material for improving the extracellular electron transfer of microbial fuel cells. *Catal. Sci. Technol.*, 2024, vol. 14, no. 2, pp. 464–477. <https://doi.org/10.1039/D3CY01510F>.

32. Zhang C., Liang P., Yang X., Jiang Y., Bian Y., Chen C., Zhang X., Huang X. Binder-free graphene and manganese oxide coated carbon felt anode for high-performance microbial fuel cell. *Biosens. Bioelectron.*, 2016, vol. 81, pp. 32–38. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2016.02.051>.
33. State Standard 32426-2013 Testing of chemicals of environmental hazard. *Lemna* spp. growth inhibition test. Moscow, Standartinform, 2019. 20 p. (In Russian)
34. Yushin Yu.V., Podkopailo R.V., Petrova D.A., Egorov K.A., Trukhin V.P. A review of culture media used for growing recombinant *Escherichia coli*. *Med. Ekstremal'nykh Situats.*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 444–453. (In Russian)
35. Zemskova L.A., Voyt A.V., Barinov N.N., Kaydalova T.A. Functional materials based on manganese dioxide deposited on carbon fiber. *Glass Phys. Chem.*, 2014, vol. 40, no. 1, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1134/S1087659614010209>.
36. Yong X.-Y., Gu D.-Y., Wu Y.-D., Yan Z.-Y., Zhou J., Wu X.-Y., Wei P., Jia H.-H., Zheng T., Yong Y.-C. Bio-Electron-Fenton (BEF) process driven by microbial fuel cells for triphenyltin chloride (TPTC) degradation. *J. Hazard. Mater.*, 2017, vol. 324, pt. B, pp. 178–183. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.047>.
37. Hodkiewicz J. Characterizing graphene with Raman spectroscopy. Thermo-Fisher Scientific Application Note, 2010. 3 p.
38. Bonpua J., Yagües Y., Aleshin A., Disappa S., Camacho J. Flame temperature effect on sp^2 bonds on nascent carbon nanoparticles formed in premixed flames ($T_{f,max} > 2100$ K): A Raman spectroscopy and particle mobility sizing study. *Proc. Combust. Inst.*, 2019, vol. 37, no. 1, pp. 943–951. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.06.124>.
39. Armano A., Agnello S. Two-dimensional carbon: a review of synthesis methods, and electronic, optical, and vibrational properties of single-layer graphene. *C*, 2019, vol. 5, no. 4, art. 67. <https://doi.org/10.3390/c5040067>.
40. Eckmann A., Felten A., Mishchenko A., Britnell L., Krupke R., Novoselov K.S., Casiraghi C. Probing the nature of defects in graphene by Raman spectroscopy. *Nano Lett.*, 2012, vol. 12, no. 8, pp. 3925–3930. <https://doi.org/10.1021/nl300901a>.
41. Lübke M., Sumboja A., McCafferty L., Armer C.F., Handoko A.D., Du Y., McColl K., Cora F., Brett D., Liu Zh., Darr J.A. Transition-metal-doped α - MnO_2 nanorods as bifunctional catalysts for efficient oxygen reduction and evolution reactions. *ChemistrySelect*, 2018, vol. 3, no. 9, pp. 2613–2622. <https://doi.org/10.1002/slct.201702514>.
42. Julien C., Massot M., Rangan S., Lemal M., Guyomard D. Study of structural defects in γ - MnO_2 by Raman spectroscopy. *J. Raman Spectrosc.*, 2002, vol. 33, no. 4, pp. 223–228. <https://doi.org/10.1002/jrs.838>.
43. Langner J., Bruns M., Dixon D., Nefedov A., Wöll Ch., Scheiba F., Ehrenberg H., Roth C., Melke J. Surface properties and graphitization of polyacrylonitrile based fiber electrodes affecting the negative half-cell reaction in vanadium redox flow batteries. *J. Power Sources*, 2016, vol. 321, pp. 210–218. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.128>.
44. Ataherian F., Lee K.-T., Wu N.-L. Long-term electrochemical behaviors of manganese oxide aqueous electrochemical capacitor under reducing potentials. *Electrochim. Acta*, 2010, vol. 55, no. 25, pp. 7429–7435. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2010.01.102>.
45. Ouda E., Yousf N., Magar H.S., Hassan R.Y.A., Duraia E.-S.M. Electrochemical properties of MnO_2 -based carbon nanomaterials for energy storage and electrochemical sensing. *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.*, 2023, vol. 34, no. 8, art. 731. <https://doi.org/10.1007/s10854-023-10107-4>.
46. Yang L., Wang A., Wen Q., Chen Y. Modified cobalt-manganese oxide-coated carbon felt anodes: An available method to improve the performance of microbial fuel cells. *Bioprocess Biosyst. Eng.*, 2021, vol. 44, no. 12, pp. 2615–2625. <https://doi.org/10.1007/s00449-021-02631-6>.

47. Yuan H., Deng L., Chen Y., Yuan Y. MnO₂/polypyrrole/MnO₂ multi-walled-nanotube-modified anode for high-performance microbial fuel cells. *Electrochim. Acta*, 2016, vol. 196, pp. 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.02.183>.
48. Mishra P., Jain R. Electrochemical deposition of MWCNT-MnO₂/PPy nanocomposite application for microbial fuel cells. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2016, vol. 41, no. 47, pp. 22394–22405. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.020>.
49. Gnana Kumar G., Awan Z., Nahm K.S., Xavier J.S. Nanotubular MnO₂/graphene oxide composites for the application of open air-breathing cathode microbial fuel cells. *Biosens. Bioelectron.*, 2014, vol. 53, pp. 528–534. <https://doi.org/10.1016/j.bios.2013.10.012>.
50. Bataillou G., Haddour N., Vollaie C. Bioelectricity production of PMFC using Lobelia Queen Cardinalis in individual and shared soil configurations. *E3S Web Conf.*, 2022, vol. 334, art. 08001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202233408001>.
51. Sarma P.J., Mohanty K. Development and comprehensive characterization of low-cost hybrid clay based ceramic membrane for power enhancement in plant based microbial fuel cells (PMFCs). *Mater. Chem. Phys.*, 2023, vol. 296, art. 127337. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127337>.
52. Sarma P.J., Mohanty K. A novel three-chamber modular PMFC with bentonite/flyash based clay membrane and oxygen reducing biocathode for long term sustainable bioelectricity generation. *Bioelectrochemistry*, 2022, vol. 144, art. 107996. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2021.107996>.
53. Bataillou G., Ondel O., Haddour N. 900-Days long term study of plant microbial fuel cells and complete application for powering wireless sensors. *J. Power Sources*, 2024, vol. 593, art. 233965. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233965>.
54. Zhou X., Xu Y., Mei X., Du N., Jv R., Hu Z., Chen S. Polyaniline/β-MnO₂ nanocomposites as cathode electrocatalyst for oxygen reduction reaction in microbial fuel cells. *Chemosphere*, 2018, vol. 198, pp. 482–491. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.058>.
55. Zhang H., Wu Y., Zhong C., Wang G., Wang B., Ma C., Zhang H., Ding C., Liu Y., Kong C., Yang Z., Wang T., Zhu H. MnO₂@rGO modified stainless steel mesh as cathode membrane in MFC-MBR for enhanced bioelectricity generation and membrane fouling mitigation. *J. Water Process Eng.*, 2024, vol. 66, art. 106111. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106111>.
56. Ntyam Mendo S.A., Kouitcheu Mabeku L.B., Tounkara L.S., Nguemezi S.T., Ngane R.A.N., Sameza L.M. Abiotic conditions on growth of *Pseudomonas fluorescens* (DS17R) and its ability to produce secondary metabolites (including phenazines) against *Phytophthora colocasiae*, the Causal agent of taro leaf blight. *Austin J. Biotechnol. Bioeng.*, 2018, vol. 5, no. 2, art. 1095.
57. Mavrodi D.V., Blankenfeldt W., Thomashow L.S. Phenazine compounds in fluorescent *Pseudomonas* spp. biosynthesis and regulation. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 2006, vol. 44, pp. 417–445. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.013106.145710>.
58. Horvath A.S., Garrick L.V., Moreau J.W. Manganese-reducing *Pseudomonas fluorescens*-group bacteria control arsenic mobility in gold mining-contaminated groundwater. *Environ. Earth Sci.*, 2014, vol. 71, no. 9, pp. 4187–4198. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2809-x>.
59. Fu Y., Yu J., Zhang Y., Meng Y. Graphite coated with manganese oxide/multiwall carbon nanotubes composites as anodes in marine benthic microbial fuel cells. *Appl. Surf. Sci.*, 2014, vol. 317, pp. 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.08.044>.
60. Gao C., Liu L., Yu T., Yang F. Development of a novel carbon-based conductive membrane with in-situ formed MnO₂ catalyst for wastewater treatment in bio-electrochemical system (BES). *J. Membr. Sci.*, 2018, vol. 549, pp. 533–542. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.12.053>.
61. Olias L.G., Otero A.R., Cameron P.J., Di Lorenzo M. A soil microbial fuel cell-based biosensor for dissolved oxygen monitoring in water. *Electrochim. Acta*, 2020, vol. 362, art. 137108. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.137108>.

Информация об авторах

Роман Владимирович Лепикаш, младший научный сотрудник лаборатории экологической и медицинской биотехнологии, Тульский государственный университет

E-mail: mr.romalep@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7853-2937>

Никита Сергеевич Захаров, младший научный сотрудник лаборатории экологической и медицинской биотехнологии, Тульский государственный университет

E-mail: zakharofnikita@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6364-3949>

Павел Владимирович Оськин, младший научный сотрудник лаборатории экологической и медицинской биотехнологии, Тульский государственный университет

E-mail: pavelfraj@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9308-6496>

Дэвард Иосифович Стом, доктор биологических наук, профессор, заслуженный работник Высшей Школы РФ, главный научный сотрудник Байкальского музея СО РАН; профессор кафедры зоологии позвоночных и экологии биолого-почвенного факультета, заведующий лабораторией водной токсикологии НИИ биологии, Иркутский государственный университет; профессор кафедры инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения, Иркутский национальный исследовательский технический университет

E-mail: stomd@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

Дарья Геннадьевна Лаврова, кандидат химических наук, старший научный сотрудник лаборатории экологической и медицинской биотехнологии, Тульский государственный университет

E-mail: d.g.fedoseeva@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5708-5453>

Сергей Валерьевич Алферов, кандидат химических наук, заведующий лаборатории экологической и медицинской биотехнологии, Тульский государственный университет

E-mail: s.v.alferov@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5217-7815>

Author Information

Roman V. Lepikash, Junior Researcher, Laboratory of Ecological and Medical Biotechnology, Tula State University

E-mail: mr.romalep@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7853-2937>

Nikita S. Zakharov, Junior Researcher, Laboratory of Ecological and Medical Biotechnology, Tula State University

E-mail: zakharofnikita@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6364-3949>

Pavel V. Oskin, Junior Researcher, Laboratory of Ecological and Medical Biotechnology, Tula State University

E-mail: pavelfraj@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9308-6496>

Devard I. Stom, Dr. Sci. (Biology), Full Professor, Honored Worker of the Higher School of Russian Federation, Chief Researcher, Baikal Museum, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences; Professor of Department of Vertebrate Zoology and Ecology, Faculty of Biology and Soil Studies, Head of Laboratory

of Aquatic Toxicology, Research Institute of Biology, Irkutsk State University; Professor of Department of Engineering Communications and Life Support Systems, Irkutsk National Research Technical University

E-mail: *stomd@mail.ru*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

Daria G. Lavrova, Cand. Sci. (Chemistry), Senior Researcher, Laboratory of Ecological and Medical Biotechnology, Tula State University

E-mail: *d.g.fedoseeva@gmail.com*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5708-5453>

Sergey V. Alferov, Cand. Sci. (Chemistry), Head of Laboratory of Ecological and Medical Biotechnology, Tula State University

E-mail: *s.v.alferov@gmail.com*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5217-7815>

Поступила в редакцию 13.09.2024

Принята к публикации 01.12.2024

Received September 13, 2024

Accepted December 1, 2024