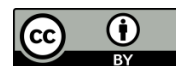


Научная статья

УДК 579.6; 573.6; 504.064.45

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-50-63>



## Комплексный биопрепарат «Доктор Робик 109» как биоагент для утилизации фитомассы водных растений в биотопливных элементах

Дэвард Иосифович Стом<sup>\*,\*\*,\*</sup>, Галина Олеговна Жданова<sup>\*</sup>,  
Наталья Юрьевна Юдина<sup>\*\*\*</sup>, Сергей Валерьевич Алферов<sup>\*\*\*\*</sup>,  
Александра Николаевна Чеснокова<sup>\*\*\*</sup>, Михаил Юрьевич Толстой<sup>\*\*\*</sup>,  
Александр Борисович Купчинский<sup>\*\*</sup>, Михаил Наумович Саксонов<sup>\*</sup>,  
Сергей Андреевич Закарчевский<sup>\*\*\*</sup>, Туугу Энхдул<sup>\*\*\*\*\*</sup>,  
Андреа Францетти<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Мустафа Рахимнеджад<sup>\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>\*\*</sup>Байкальский музей СО РАН, п. Листвянка, Российская Федерация

<sup>\*\*\*</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
г. Иркутск, Российская Федерация

<sup>\*\*\*\*</sup>Тульский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Монгольский государственный университет, г. Улан-Батор, Монголия

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Миланский университет Бикокка, г. Милан, Италия

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Технологический университет Бабола Ноширвани, г. Баболь, Иран

Автор, ответственный за переписку: Стом Дэвард Иосифович, [stomd@mail.ru](mailto:stomd@mail.ru)

**Аннотация.** Показана возможность использования комплексного микробиологического препарата для выгребных ям и септиков «Доктор Робик 109» (ООО «ВИПЭКО», Россия) с целью получения электрического тока в биотопливных элементах при утилизации фитомассы водных растений *Ulothrix* sp., *Spirogyra* sp., *Eloдея canadensis*. При этом кинетика электрических параметров исследуемых биотопливных элементов отличалась устойчивым ростом в течение длительного времени – не менее 30 сут. Это может быть связано с медленной трансформацией используемого субстрата микроорганизмами, что, с другой стороны, обеспечивает длительную работу биотопливных элементов на их основе. В биотопливных элементах с фитомассой *Spirogyra* sp. биопрепарат генерировал напряжение (разомкнутой цепи) до 746 мВ, силу тока (в режиме короткого замыкания) – до 1745 мкА. В биотопливных элементах с добавлением *Ulothrix* sp. указанные показатели в течение 25 сут. достигали 360 мВ и 1120 мкА соответственно. При использовании в качестве субстрата *E. canadensis* изучаемые микроорганизмы-биоагенты в течение 25 сут. генерировали напряжение до 643 мВ, силу тока – до 568 мкА. Повышение электрических параметров биотопливных элементов на основе исследуемого биопрепарата и фитомассы высших водных растений и водорослей сопровождалось приростом численности жизнеспособных клеток микроорганизмов и уменьшением биомассы растений. Предлагаемое использование водных растений в биотопливных элементах является одним из перспективных подходов к утилизации их избыточной фитомассы. Последняя в значительных количествах накапливается после ее применения в фиторемедиационных мероприятиях доочистки сточных вод или разрастается в водоемах в результате их эвтрофирования.

**Ключевые слова:** генерирование электрического тока, биотопливные элементы, биотехнология, фитомасса, водные растения, микробиологический препарат «Доктор Робик 109»

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в области научной деятельности (проект № FEWG-2021-0013).

**Для цитирования:** Стом Д. И., Жданова Г. О., Юдина Н. Ю., Алферов С. В., Чеснокова А. Н., Толстой М. Ю., Купчинский А. Б., Саксонов М. Н., Закарчевский С. А., Энхдул Т., Францетти А., Рахимнеджад М. Комплексный биопрепарат «Доктор Робик 109» как биоагент для утилизации фитомассы водных растений в биотопливных элементах // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2022. Т. 12. N 1. С. 50–63. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-50-63>.

© Стом Д. И., Жданова Г. О., Юдина Н. Ю., Алферов С. В., Чеснокова А. Н., Толстой М. Ю., Купчинский А. Б., Саксонов М. Н., Закарчевский С. А., Энхдул Т., Францетти А., Рахимнеджад М., 2022

## The "Doctor Robik 109" complex biopreparation as a bioagent for utilizing aquatic plant phytomass in biofuel cells

Devard I. Stom<sup>\*,\*\*,\*</sup>, Galina O. Zhdanova<sup>\*</sup>,  
Natalia Yu. Yudina<sup>\*\*\*\*</sup>, Sergey V. Alferov<sup>\*\*\*\*</sup>,  
Alexandra N. Chesnokova<sup>\*\*\*</sup>, Mikhail Yu. Tolstoy<sup>\*\*\*</sup>,  
Alexander B. Kupchinsky<sup>\*\*</sup>, Mikhail N. Saksonov<sup>\*</sup>,  
Sergey A. Zakarchevskiy<sup>\*\*\*</sup>, Tuugu Enkhdul<sup>\*\*\*\*\*</sup>,  
Andrea Franzetti<sup>\*\*\*\*\*</sup>, Mostafa Rahimnejad<sup>\*\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

<sup>\*\*</sup>Baikal Museum of the SB RAS, Listvyanka, Russian Federation

<sup>\*\*\*</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

<sup>\*\*\*\*</sup>Tula State University, Tula, Russian Federation

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Mongolian State University, Ulaanbaatar, Mongolia

<sup>\*\*\*\*\*</sup>University of Milano – Bicocca, Milano, Italy

<sup>\*\*\*\*\*</sup>Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Corresponding author: Devard I. Stom, stomd@mail.ru

**Abstract.** The paper demonstrates the possibility of using the "Doctor Robik 109" complex microbiological preparation (OOO VIPEKO, Russia), applied in cesspools and sewage caissons, for obtaining electric current in biofuel elements during the utilization of the *Ulothrix* sp., *Spirogyra* sp., *Elodea canadensis* aqueous plant phytomass. The kinetics of electrical parameters of the studied biofuel cells was characterized by a steady and prolonged growth – for at least 30 days. This may be associated with the slow transformation of the used substrate by microorganisms, which additionally ensures the long-term operation of biofuel cells on their basis. In *Spirogyra* sp. biofuel cells, the biological preparation generated the voltage (broken circuit mode) and current strength (short circuit mode) equal up to 746 mV and 1745 A, respectively. In *Ulothrix* sp. biofuel cells, these values comprised 360 mV and 1120  $\mu$ A for a 25-day period, respectively. When using a *E. canadensis* substrate, the studied bioagent microorganisms generated the voltage and current of up to 643 mV and 568  $\mu$ A during a 25-day period, respectively. An increase in the electrical parameters of biofuel cells, which were based on the studied biological preparation and the phytomass of higher aquatic plants and algae, was accompanied by an increase in the number of viable microorganism cells and a decrease in the plant biomass. Since phytomass growth is activated by the phytoremediation measures of additional wastewater treatment or during the eutrophication of water bodies, the proposed method for applying aquatic plants in biofuel cells represents a promising approach to utilizing excess phytomass.

**Keywords:** electric current generation, biofuel cells, biotechnology, phytomass, aquatic plants, "Doctor Robik 109" microbiological preparation

**Funding.** The reported study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of a State assignment in the field of scientific activity (project no. FEWG-2021-0013).

**For citation:** Stom D. I., Zhdanova G. O., Yudina N. Yu., Alferov S. V., Chesnokova A. N., Tolstoy M. Yu., Kupchinsky A. B., Saksonov M. N., Zakarchevskiy S. A., Enkhdul T., Franzetti A., Rahimnejad M. The "Doctor Robik 109" complex biopreparation as a bioagent for utilizing aquatic plant phytomass in biofuel cells. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* = *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(1):50-63. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2022-12-1-50-63>.

### ВВЕДЕНИЕ

В экологическом плане растительные отходы являются одними из наиболее безопасных. Они нетоксичны, имеют высокую ценность в сельском хозяйстве при их компостировании. Однако объемы растительных отходов очень велики, а продукты гниения растительной массы могут оказывать негативные эффекты на окружающую среду. Так, в водоемах зачастую происходит массо-

вое развитие водной растительности, которая при загрязнении вод биогенными элементами приводит к эвтрофированию [1, 2]. При этом избыточная фитомасса, накапливаясь, становится источником процессов гниения, продукты которого ведут к заморам, могут вызывать гибель или угнетение гидробионтов [3, 4]. Ярким примером таких процессов является массовое размножение в последние годы в Байкале нитчатых водо-

рослей рода *Spirogira* [5, 6]. Большую проблему составляет отмирающая и подвергающаяся процессам гниения фитомасса водорослей, метаболиты которых могут негативно влиять на гидробионты литорали Байкала [7].

Накопление фитомассы в значительных количествах происходит и в фиторемедиационных мероприятиях – в очистке загрязненных вод с помощью растений [8–10]. Этот подход основан как раз на способности водных растений к поглощению различных соединений из водных сред. Очистка вод ими сопровождается бурным ростом растений, в результате чего встает проблема дальнейшей переработки избыточной фитомассы после накопления ею загрязнителей, порой достаточно токсичных [11, 12].

Важнейшей задачей рационального природопользования является превращение отходов в сырье [13, 14]. Биотехнологические подходы к утилизации растительных отходов подразумевают получение из них биогаза [15, 16], биоэтанола [17–19], некоторых других продуктов [20–22]. Кроме того, эти отходы находят применение в пищевой и фармацевтической промышленности, поскольку являются богатым источником антиоксидантных молекул, проявляют множество биологических свойств, включая противодиабетические, гипотензивные, противораковые и антибактериальные свойства [23–27].

Еще одним из возможных путей утилизации растительных отходов является их использование в качестве субстрата в процессах генерирования электрической энергии в биотопливных элементах (БТЭ) [28–30]. Технология БТЭ занимает определенную нишу в области альтернативной энергетики. С одной стороны, электрическая энергия, получаемая в процессах микробной трансформации соединений в БТЭ, сегодня еще довольно мала. С другой стороны, эта технология позволяет совмещать получение электроэнергии с утилизацией различных отходов и очисткой сточных вод, т.е. играть важную роль и в сохранении окружающей среды. Таким образом, это направление открывает новые перспективы для развития энергетики, особенно на фоне ограничений использования и значительного снижения запасов основных энергоносителей (угля, нефти, природного газа) и непрерывного накопления различных отходов.

Ранее нами была продемонстрирована хорошая электрогенная активность в БТЭ биопрепарата «Доктор Робик 109» [31–33]. Под торговой маркой «Доктор Робик» скрывается целая линейка средств, биоактиваторов, бактерий для разложения, очистки, эксплуатации выгребных ям, септиков, дачных и деревенских туалетов<sup>1</sup>.

Эта серия биопрепаратов выпускается в России компанией «ВИПЭКО», которая в том числе опирается на опыт и технологии всемирного лидера в области производства биотехнологических препаратов, направленных на очистку промышленных стоков, – компании ROEBIC Laboratories, Inc. (США).

В данной работе приводятся материалы по исследованию эффективности работы БТЭ на основе комплексного коммерческого микробиологического препарата для выгребных ям и септиков «Доктор Робик 109» при утилизации фитомассы различных водных растений (*Elodea canadensis*, *Spirogira* sp., *Ulothrix* sp.).

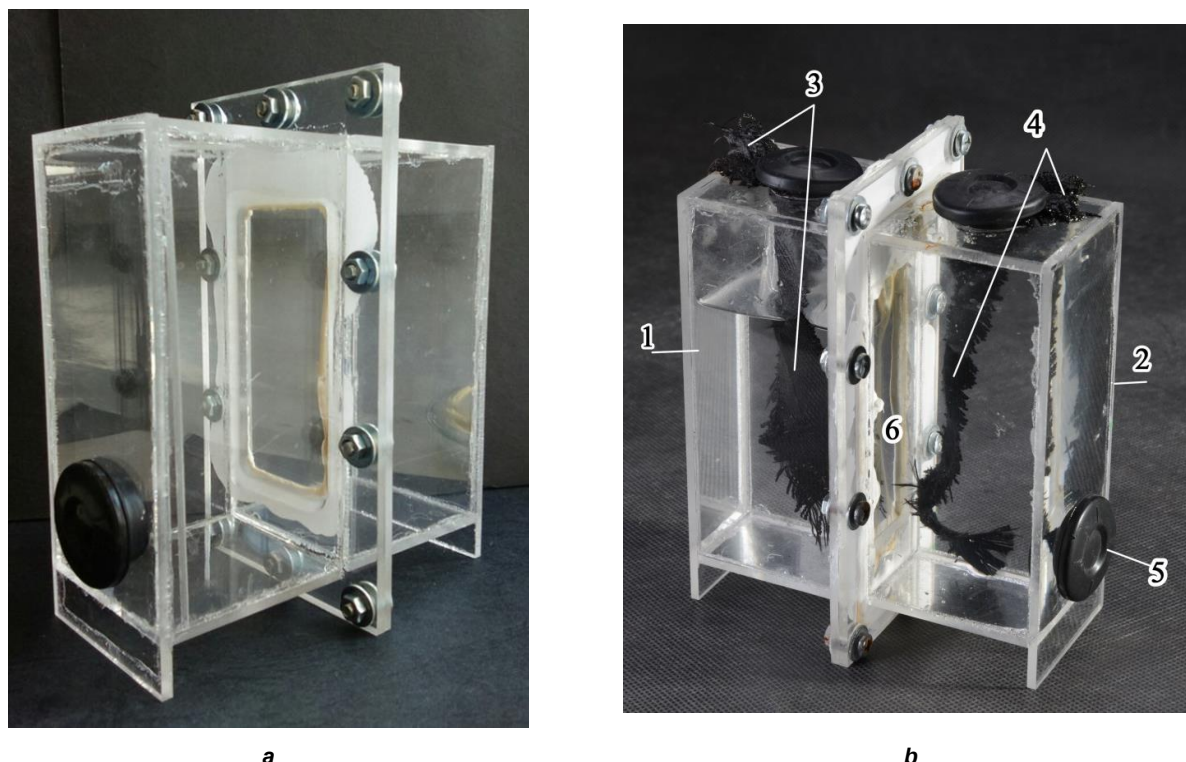
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

**Объекты и методы исследования.** Эксперименты проводили в двухкамерных БТЭ [34]. В качестве материала для их изготовления использовали оргстекло Plexiglas (Германия) толщиной 3 мм. Две прямоугольные камеры (каждая объемом 400 мл) сообщались друг с другом через прямоугольные отверстия (размером 40×12 мм) в боковой части каждой из камер, в которых фиксировали протоннообменную мембрану МФ-4СК (ЗАО «Пластполимер», Россия) (рис. 1).

В верхней крышке каждой из камер имелись отверстия (диаметром 24 мм) для размещения рабочих электродов – углеродной ткани «Урал Т-22Р А» (ОАО «СветлогорскХимволокно», Беларусь). В катодной камере также располагалось дополнительное отверстие для аэрации католита. Анодную камеру закупоривали полностью для обеспечения анаэробных условий анолита.

Анолитом и католитом в БТЭ являлась стерильная модельная сточная вода следующего состава (мг/л): натрий углекислый 50,0; калий фосфорнокислый однозамещенный 25,0; аммоний фосфорнокислый двузамещенный 25,0; кальций хлористый 7,5; магний сернокислый 5,0 (ГОСТ Р 50595–1993). Стерилизацию проводили автоклавированием при 1 атм в течение 45 мин. Биоагентом в работе выступал комплексный коммерческий микробиологический препарат для выгребных ям и септиков «Доктор Робик 109» (ООО «ВИПЭКО», Россия). Он является сильнодействующей композицией из 4-х специально отобранных культур микроорганизмов – *Bacillus amyloliquefaciens*, *B. pumilis*, *B. licheniformis*, *B. subtilis*. Это почвенные спорообразующие бактериальные культуры, способные утилизировать жиры, белок, крахмал, целлюлозу, мочевины. В составе препарата бациллы представлены спорами в комплексе с пшеничными отрубями и пищевой содой. Титр микроорганизмов в препарате –  $3 \times 10^{10}$  КОЕ/г.

<sup>1</sup>Сайт компании-производителя биопрепарата «Доктор Робик 109» (ООО «ВИПЭКО») [Электронный ресурс]. URL: <http://drrobik.ru/> (05.03.2022).



**Рис. 1.** Используемый в работе двухкамерный биотопливный элемент из оргстекла с расположенной между камерами протонообменной мембраной МФ-4СК (ЗАО «Пластполимер», Россия) (а), (б).

Обозначения (б): 1 – анодная камера; 2 – катодная камера; 3 – катодный электрод; 4 – анодный электрод; 5 – резиновые крышки, закрывающие и фиксирующие электроды; 6 – резиновая заглушка в анодной камере, через которую отбирают пробы и вносят субстраты и биоагенты при помощи шприца; 7 – протонообменная мембрана МФ-4СК

**Fig. 1.** Two-chamber biofuel plexiglass cell with MF-4SK proton-exchange membrane (CJSC Plastpolimer, Russia) located between the chambers (a), (b):

1 – anode chamber; 2 – cathode chamber; 3 – cathode electrode;  
 4 – anode electrode; 5 – rubber covers covering and fixing the electrodes;  
 6 – rubber plug for sampling and injecting substrates and bioagents;  
 7 – proton exchange membrane MF-4SK

Биопрепарат вносили в БТЭ в виде суспензии спор. Для ее получения 1 г сухого препарата вводили в 30 мл стерильного физиологического раствора. Полученную взвесь в течение 20 мин перемешивали на магнитной мешалке. После этого отстаивали в течение 2–3 мин для оседания опилок и отбирали верхний слой жидкости. Этой суспензией, содержащей споры микроорганизмов препарата, инокулировали БТЭ. Титр клеток при внесении в БТЭ составлял  $\sim 10^5$  КОЕ/мл.

Субстратом для микроорганизмов в БТЭ являлась растительная масса растений оз. Байкал и водоемов его водосборного бассейна: *Elodea canadensis* (элодея канадская), *Spirogyra* sp. (спирогира), *Ulothrix* sp. (улотрикс). Сбор *E. canadensis* осуществляли в р. Ангаре вручную при помощи «кошек», остальных растений – в оз. Байкал с привлечением водолазной техники и специалистов Байкальского музея СО РАН. После сбора растения высушивали при температуре 105 °С до постоянной массы. Затем высушенную биомассу измельчали до образования крошки размером около 1–2 мм. В анолит БТЭ вносили фитомассу

в количестве 1 г (из расчета на камеру).

Перед началом работы обе камеры БТЭ стерилизовали 3%-м раствором перекиси водорода в течение 20 мин. После этого каждый отсек БТЭ тщательно промывали стерильной водой, чтобы удалить остатки  $H_2O_2$ . Далее БТЭ помещали под ультрафиолетовую лампу (МЕД-1, Россия) на 15 мин. После этого с соблюдением всех правил асептики камеры БТЭ заполняли модельной сточной водой: анодную ячейку – полностью до самого верха, а катодную – на 2–3 см ниже верхнего уровня отсека. Это позволяло минимизировать присутствие кислорода воздуха в анолите путем вытеснения его жидкостью, а католит, напротив, аэрировать. Через специальные отверстия в верхней части камер в БТЭ размещали анодный и катодный электроды, которые фиксировали резиновыми пробками, плотно прилегающими к крышке. Биоагенты и субстрат вносили при помощи стерильного шприца через специальную резиновую заглушку в боковой части анодной камеры.

Регистрацию силы тока и напряжения прово-

дили двумя способами: с использованием цифрового мультиметра Fluke 17 В (Fluke Corporation, США) и при помощи автоматической системы регистрации данных с биотопливных элементов. Система состоит из микропроцессорной платы Arduino Mega 2560 (Arduino, Италия), персонального компьютера и платы адаптера для подсоединения к топливным элементам.

Численность клеток микроорганизмов препарата в БТЭ оценивали методом Коха [35]. Отбор проб анолита производили при помощи стерильного шприца через специальную резиновую заглушку в боковой части анодной камеры. Инкубирование бактерий осуществляли на рыбо-пептонном агаре в течение 2-х сут.

Убыль субстрата (растительной массы) в анолите БТЭ анализировали весовым методом<sup>2</sup>.

Все эксперименты проводили не менее чем в 3-х независимых опытах с 3-мя параллельными измерениями в каждом. Статистическая обработка экспериментальных данных была проведена с использованием пакета программ Microsoft Office. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза  $P > 0,95$ . В таблицах и графиках представлено стандартное отклонение средней арифметической.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Микроорганизмы биопрепарата «Доктор Робик 109» генерировали электрический ток в БТЭ при использовании в качестве субстрата фитомассы всех 3-х испытанных растений – *E. canadensis*, *Spirogira* sp., *Ulothrix* sp. При этом кинетика электрических параметров исследуемых БТЭ отличалась устойчивым ростом в течение длительного времени – до 25–30 сут. Это может быть связано с медленной трансформацией используемого субстрата микроорганизмами, что, с другой стороны, обеспечивает длительную работу БТЭ на их основе. Так, в БТЭ с фитомассой (1 г) *Spirogira* sp., добавленной в анодный отсек, напряжение (разомкнутой цепи), генерируемое биопрепаратом «Доктор Робик 109», возрастало на протяжении всех 25 сут. эксперимента. На момент его окончания оно достигало 746 мВ. Показатель значительно превышал значения контрольных БТЭ (субстрат без микроорганизмов – не более 80 мВ, микроорганизмы без субстрата – не выше 249 мВ). Это подтверждало утилизацию фитомассы растения микроорганизмами биопрепарата в процессе генерирования электрического тока в БТЭ (рис. 2).

Сила тока (измеренная в режиме короткого замыкания) в испытуемых БТЭ с микробиологическим препаратом «Доктор Робик 109» и фитомассой спирогиры к 25 сут. эксперимента возрастала до 1745 мкА. В контрольных БТЭ этот показатель не превышал 370 мкА (рис. 3).

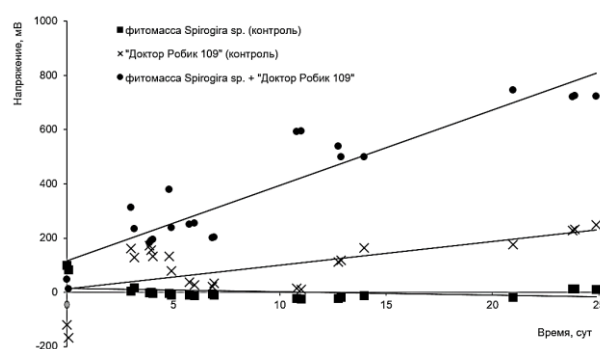


Рис. 2. Динамика напряжения (измерено в режиме разомкнутой цепи), генерируемого в биотопливном элементе микроорганизмами биопрепарата «Доктор Робик 109» при использовании высушенной фитомассы *Spirogira* sp. в качестве субстрата

Fig. 2. Dynamics of voltage (measured in open circuit mode) generated in biofuel cell with microorganisms of the "Doctor Robik 109" biopreparation using dried phytomass of *Spirogira* sp. as a substrate

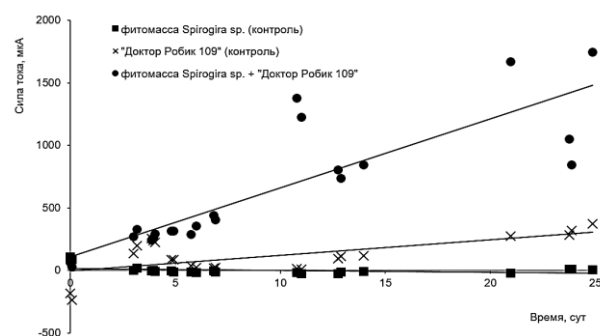


Рис. 3. Динамика силы тока (измерено в режиме короткого замыкания), генерируемого в биотопливном элементе микроорганизмами биопрепарата «Доктор Робик 109» при использовании высушенной фитомассы *Spirogira* sp. в качестве субстрата

Fig. 3. Dynamics of current strength (measured in short circuit mode) generated in biofuel cell with microorganisms of the biological product "Doctor Robik 109" using the dried phytomass of *Spirogira* sp. as a substrate

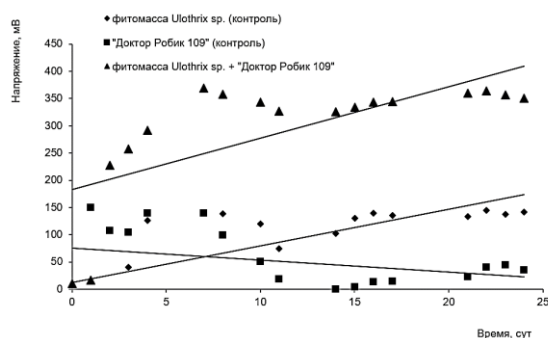
В БТЭ с добавлением *Ulothrix* sp. напряжение разомкнутой цепи, генерируемое препаратом «Доктор Робик 109», в течение 25 сут. возрастало до 360 мВ. При этом сила тока короткого замыкания увеличивалась до 1120 мкА (рис. 4, 5).

При использовании в качестве субстрата *E. canadensis* изучаемые микроорганизмы-биоагенты в течение 25 сут. генерировали напряжение до 643 мВ (рис. 6). Сила тока короткого замыкания в этом случае достигала 568 мкА (рис. 7).

Параллельно измерению электрических параметров анализировали и кинетику роста численности микроорганизмов «Доктор Робик 109» в ходе их работы в БТЭ при утилизации фитомассы водных растений. Наиболее интенсивный прирост численности микроорганизмов препара-

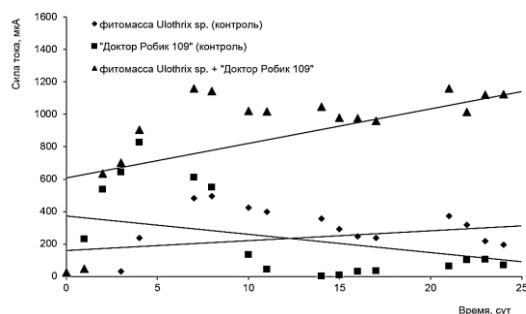
<sup>2</sup>ГОСТ Р 51437–99. Соки фруктов и овощей. Гравиметрический метод определения массовой доли общих сухих веществ по убыли массы при высушивании. Издание официальное. М.: Изд-во стандартов, 1999. 16 с.

та «Доктор Робик 109» отмечали в БТЭ с добавлением в качестве субстрата элодеи. Например, в течение 20 сут. эксперимента количество клеток этого препарата в БТЭ с элодеей повышалось с  $(9,8 \pm 0,6) \times 10^5$  до  $(4,67 \pm 0,47) \times 10^8$  КОЕ/мл. Несколько меньший прирост общего микробного числа препарата «Доктор Робик 109» наблюдали в БТЭ с добавлением спирогиры (с  $(8,7 \pm 0,6) \times 10^5$  до  $(3,5 \pm 0,1) \times 10^8$  КОЕ/мл) и улотрикса (с  $(6,7 \pm 0,7) \times 10^5$  до  $(2,5 \pm 0,2) \times 10^8$  КОЕ/мл). Наименее интенсивно увеличивалась численность клеток препарата при использовании в качестве субстрата эдогонима – титр возрастал с  $(7,0 \pm 0,9) \times 10^5$  до  $(1,5 \pm 0,2) \times 10^8$  КОЕ/мл (рис. 8).



**Рис. 4.** Динамика напряжения (измерено в режиме разомкнутой цепи), генерируемого в биотопливном элементе микроорганизмами биопрепарата «Доктор Робик 109» при использовании высушенной фитомассы *Ulothrix* sp. в качестве субстрата

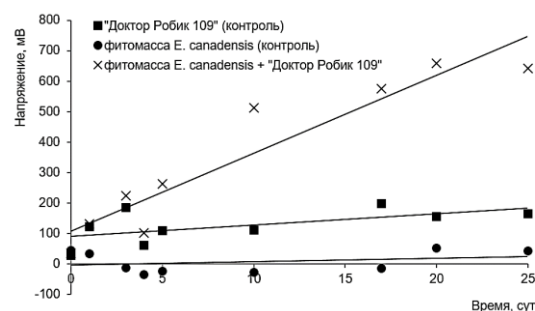
**Fig. 4.** Dynamics of voltage (measured in open circuit mode) generated in biofuel cell with microorganisms of the biological product "Doctor Robik 109" using dried phytomass *Ulothrix* sp. as a substrate



**Рис. 5.** Динамика силы тока (измерено в режиме короткого замыкания), генерируемого в биотопливном элементе микроорганизмами биопрепарата «Доктор Робик 109» при использовании высушенной фитомассы *Ulothrix* sp. в качестве субстрата

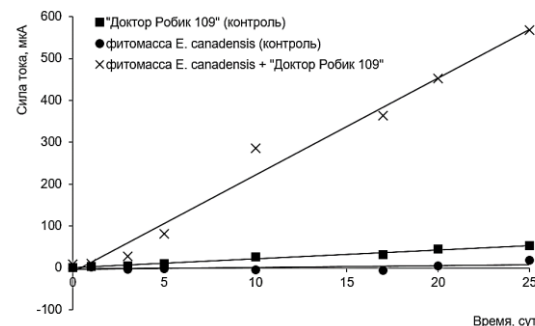
**Fig. 5.** Dynamics of the current strength (measured in short circuit mode) generated in biofuel cell with microorganisms of the biological product "Doctor Robik 109" using the dried phytomass of *Ulothrix* sp. as a substrate

С использованием гравиметрического метода оценивали убыль в БТЭ фитомассы *E. canadensis*, *Ulothrix* sp., *Spirogyra* sp. под воздействием микроорганизмов биопрепарата «Доктор Робик 109». Для этого определяли исходный сухой вес фитомассы, вносимой в среду, и вес после контакта с микроорганизмами в течение 30 сут.



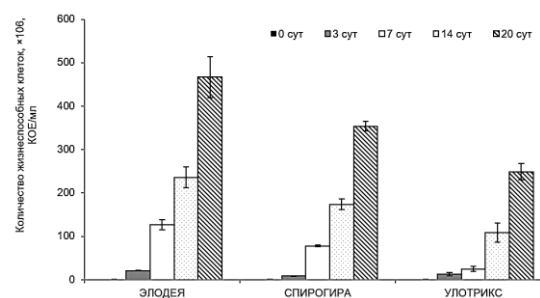
**Рис. 6.** Динамика напряжения (измерено в режиме разомкнутой цепи), генерируемого в биотопливном элементе микроорганизмами биопрепарата «Доктор Робик 109» при использовании высушенной фитомассы *E. canadensis* в качестве субстрата

**Fig. 6.** Dynamics of voltage (measured in open circuit mode) generated in biofuel cell with microorganisms of the biological product "Doctor Robik 109" using dried *E. canadensis* phytomass as a substrate



**Рис. 7.** Динамика силы тока (измерено в режиме короткого замыкания), генерируемого в биотопливном элементе микроорганизмами биопрепарата «Доктор Робик 109» при использовании высушенной фитомассы *E. canadensis* в качестве субстрата

**Fig. 7.** Dynamics of the current strength (measured in short circuit mode) generated in biofuel cell with microorganisms of the biological product "Doctor Robik 109" using dried *E. canadensis* phytomass as a substrate



**Рис. 8.** Численность жизнеспособных клеток комплексного коммерческого микробиологического препарата «Доктор Робик 109» при его культивировании в условиях биотопливного элемента в модельной сточной воде с добавлением высушенной фитомассы *E. canadensis*, *Ulothrix* sp., *Spirogyra* sp. в качестве субстрата

**Fig. 8.** The number of viable cells of the complex commercial microbiological preparation "Doctor Robik 109" during its cultivation in a biofuel cell in model wastewater with the addition of dried phytomass *E. canadensis*, *Ulothrix* sp., *Spirogyra* sp. as a substrate

Исследование утилизации высушенной фитомассы водных растений микробиологическим препаратом «Доктор Робик 109» в анаэробных условиях биотопливного элемента

Study of the utilization of aquatic plants dried phytomass by the microbiological preparation "Doctor Robik 109" under anaerobic conditions in biofuel cell

| Исходная масса навески фитомассы, мг |        | Масса навески фитомассы водных растений после ее обработки микробиологическими препаратами в течение 30 сут. в условиях биотопливного элемента, мг |                                                         |
|--------------------------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
|                                      |        | Модельная сточная вода + фитомасса (контроль)                                                                                                      | Модельная сточная вода + фитомасса + «Доктор Робик 109» |
| <i>E. canadensis</i>                 | 80,0±0 | 79,0±0,5                                                                                                                                           | 53,3±6,8                                                |
| <i>Ulothrix</i> sp.                  | 80,0±0 | 77,1±0,4                                                                                                                                           | 49,4±3,0                                                |
| <i>Spirogyra</i> sp.                 | 80,0±0 | 79,0±0,2                                                                                                                                           | 52,6±5,9                                                |



**Рис. 9.** Работа светодиода при последовательном соединении 7-ми биотопливных элементов в автономный энергокомплекс (среда – модельная сточная вода, биоагент – микробный препарат «Доктор Робик 109», субстрат – высушенная растительная масса *E. canadensis*)

**Fig. 9.** LED operation with 7 biofuel cells connected in series into an autonomous energy complex (environment – model waste water, bioagent – microbial preparation "Doctor Robik 109", substrate – dried plant mass *E. canadensis*)

В результате было зафиксировано снижение массы навески *E. canadensis* после ее обработки препаратом «Доктор Робик 109». В частности, масса *E. canadensis* за 30 сут. эксперимента снижалась с 80,0±0 до 53,3±6,8 мг, *Ulothrix* sp. – до 49,4±3,0 мг, *Spirogyra* sp. – 52,6±5,9 мг (см. таблица).

Следует отметить, что достаточно низкая скорость разложения микроорганизмами фитомассы водных растений и водорослей (по сравнению с простыми углеводами, аминокислотами, пептидами и др. веществами, наиболее часто используемыми в качестве субстратов в БТЭ) обуславливает длительное и стабильное функционирование БТЭ на их основе.

Так, семь макетов БТЭ, анолит которых содержал биопрепарат «Доктор Робик 109К» и растительную массу *E. canadensis*, были собраны в электрическую цепь путем их последовательного соединения. Полученный энергокомплекс генерировал напряжение разомкнутой цепи около 4,1 В при токе короткого замыкания 1,4–1,5 мА. Энергия, генерируемая собранным энергокомплексом, обеспечила непрерывную работу светодиода

да (см. рис. 9) в течение 14 сут. эксперимента без дополнительного вмешательства в работу системы – без дополнительного внесения новых порций субстрата или биоагента.

Предлагаемое использование водных растений является одним из перспективных подходов к утилизации их избыточной фитомассы, которая в значительных количествах накапливается после ее применения в фиторемедиационных мероприятиях доочистки сточных вод или разрастается в водоемах в результате их эвтрофирования. Такая ситуация, например, складывается в настоящее время в Байкальском регионе. Прибрежные зоны Байкала, его заливы являются наиболее широко используемыми для рекреационных целей, соответственно, в них обнаруживаются повышенные концентрации биогенных элементов как следствие антропогенного загрязнения. Избыточное накопление растительной массы и ее последующее разложение создает угрозу уникальным биоценозам оз. Байкал. Таким образом, предлагаемый путь использования фитомассы водных растений в представленных энергокомплексах имеет и экологическое значение.

Возможность переработки в БТЭ растительных отходов открывает перспективы использования этой технологии не только в крупных масштабах, но и в рамках приусадебных участков, личных хозяйств. Возможно создание небольших автономных устройств на основе БТЭ, субстратом в которых могли бы выступать растительные остатки, которые обычно претерпевают компостирование либо просто подвергаются сжиганию после высушивания. Утилизация растительной массы в БТЭ ранее была показана разными авторами [36–39]. Однако использование чистых штаммов бактерий, описанных авторами цитируемых выше работ, в рамках приусадебных подсобных хозяйств затруднительно. Это потребует возможности поддержания культуры, приготовления питательных сред, владения микробиологической техникой и оборудованием и пр. Поэтому использование готового коммерческого биопрепарата, такого как «Доктор Робик 109», значительно упрощает процесс запуска работы БТЭ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментально показана возможность применения фитомассы высших водных растений, используемых для фиторемедиации водных сред, а также водорослей, активно размножающихся и вызывающих эвтрофирование водоемов, в качестве субстрата для получения электрической энергии микроорганизмами в БТЭ. Высокую электрогенную активность при применении в качестве субстрата биомассы

*Ulothrix* sp., *Spirogyra* sp., *E. canadensis* показал комплексный коммерческий микробиологический препарат «Доктор Робик 109». Повышение генерируемых электрических параметров БТЭ на основе исследуемого биопрепарата и фитомассы водных растений и водорослей (*Ulothrix* sp., *Spirogyra* sp., *Elodea canadensis*) сопровождалось приростом численности жизнеспособных клеток микроорганизмов и уменьшением биомассы растений.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Bhagowati B., Ahamad K. U. A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling // *Ecohydrology & Hydrobiology*. 2019. Vol. 19, no. 1. P. 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002>.
2. Kobanova G. I., Takhteev V. V., Rusanovskaya O. O., Timofeyev M. A. Lake Baikal ecosystem faces the threat of eutrophication // *International Journal of Ecology*. 2016. Vol. 2016. P. 1–8. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6058082>.
3. Kai W. U., Xuzhou M. A., Youcheng W., Wu W., Yuelin L. Effect of three water plants decomposition on water quality // *Journal of Shanghai Ocean University*. 2016. Vol. 25, no. 5. P. 726–734.
4. Tang J.-Y., Cao P.-P., Xu Ch., Liu M.-S. Effects of aquatic plants during their decay and decomposition on water quality // *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*. 2013. Vol. 24, no. 1. P. 83–89.
5. Timoshkin O. A., Samsonov D. P., Yamamuro M., Moore M. V., Belykh O. I., Malnik V. V., et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? // *Journal of Great Lakes Research*. 2016. Vol. 42, no. 3. P. 487–497. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>.
6. Kravtsova L. S., Izhboldinalgor L. A., Khanaev I. V., Pomazkina G. V., Rodionova E. V., Domyshva V. M., et al. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal // *Journal of Great Lakes Research*. 2014. Vol. 40, no. 2. P. 441–448. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.02.019>.
7. Khanaev I. V., Kravtsova L. S., Maikova O. O., Bukshuk N. A., Sakirko M. V., Kulakova N. V., Butina T. V., et al. Current state of the sponge fauna (Porifera: Lubomirskiidae) of Lake Baikal: Sponge disease and the problem of conservation of diversity // *Journal of Great Lakes Research*. 2018. Vol. 44, no. 1. P. 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.10.004>.
8. Malaviya P., Singh A., Anderson T. A. Aquatic phytoremediation strategies for chromium removal // *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2020. Vol. 19. P. 897–944. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09552-y>.
9. Delgado-González C. R., Madariaga-Navarrete A., Fernández-Cortés J. M., Islas-Pelcastre M., Oza G., Iqbal H. M. N., et al. Advances and applications of water phytoremediation: a potential biotechnological approach for the treatment of heavy metals from contaminated water // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18, no. 10. P. 5215. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105215>.
10. Jeevanantham S., Saravanan A., Hemavathy R. V., Senthil Kumar P., Yaashikaa P. R., Yuvaraj D. Removal of toxic pollutants from water environment by phytoremediation: A survey on application and future prospects // *Environmental Technology & Innovation*. 2019. Vol. 13. P. 264–276. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.12.007>.
11. Kathi S. Chapter 6 – Bioenergy from phytoremediated phytomass of aquatic plants via gasification // *Bioremediation and Bioeconomy*. 2016. P. 111–128. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802830-8.00006-X>.
12. Rezanian S., Park J., Rupani P. F., Darajeh N., Xu X., Shahrokhishahraki R. Phytoremediation potential and control of *Phragmites australis* as a green phytomass: an overview // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 7428–7441. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04300-4>.
13. Castillo-Llamas A. D., del Río P. G., Pérez-Pérez A., Yáñez R., Garrote G., Gullón B. Recent advances to recover value-added compounds from avocado by-products following a biorefinery approach // *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2021. Vol. 28. P. 100433. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100433>.
14. Abdel-Shafy H. I., Mansour M. S. M. Solid waste issue: sources, composition, disposal, recycling, and valorization // *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018. Vol. 27, no. 4. P. 1275–1290. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>.
15. Saravanan A., Kumar P. S., Khoo K. Sh., Show P.-L., Carolin C. F., Jackulin C. F., et al. Biohydrogen from organic wastes as a clean and environment-friendly energy source: Production pathways, feedstock types, and future prospects // *Biorenewable Technology*. 2021. P. 126021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126021>.
16. da Silva Mazareli R. C., Montoya A. C. V., Delforno T. P., Centurion V. B., de Oliveira V. M., Silva E. L., et al. Enzymatic routes to hydrogen and organic acids production from banana waste fermentation by autochthonous bacteria: optimization of pH and temperature // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, no. 12. P. 8454–8468. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.063>.

17. Байбакова О. В. Химико-энзиматическая конверсия в биоэтанол отходов злаковых культур // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2016. Т. 6. N 2. С. 51–56. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-2-51-56>.
18. Ledesma B., Beltramone A. Revalorization of agro-industrial waste as a catalyst source for production of biofuels // Renewable Energy. 2021. Vol. 174. P. 747–757. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.131>.
19. Zanivan J., Bonatto C., Scapini T., Dalastra C., Bazoti S. F., Júnior S. L. A., et al. Evaluation of bioethanol production from a mixed fruit waste by *Wickerhamomyces* sp. UFFS-CE-3.1.2 // BioEnergy Research. 2021. P. 1–8. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10273-5>.
20. Reshmy R., Philip E., Madhavan A., Sindhu R., Binod P., Balakumaran P. A., et al. Potential utilisation of fruit and vegetable waste: an overview // Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products. 2021. P. 179–191. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7_11).
21. Shrestha S., Khatiwada J. R., Sharma H. K., Qin W. Bioconversion of fruits and vegetables wastes into value-added products // Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products. 2021. P. 145–163. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7_9).
22. Mehmood T., Nadeem F., Qamar S. A., Bilal M., Iqbal H. M. N. Bioconversion of agro-industrial waste into value-added compounds // Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products. 2021. P. 349–368. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7_22).
23. Santhi V. P., Sriramavaratharajan V., Murugan R., Masilamani P., Gurav Sh. S., Sarasu V. P., et al. Edible fruit extracts and fruit juices as potential source of antiviral agents: a review // Journal of Food Measurement and Characterization. 2021. Vol. 15. P. 5181–5190. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01090-7>.
24. Abari A. H., Rourani H. A., Ghasemi S. M., Kim H., Kim Y.-G. Investigation of antioxidant and anticancer activities of unsaturated oligogalacturonic acids produced by pectinase of *Streptomyces hydrogenans* YAM1 // Scientific Reports. 2021. Vol. 11. Article number 8491. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87804-9>.
25. Lizárraga-Velázquez C. E., Leyva-López N., Hernández C., Gutiérrez-Grijalva E. P., Salazar-Leyva J. A., Osuna-Ruiz I., et al. Antioxidant molecules from plant waste: extraction techniques and biological properties // Processes. 2020. Vol. 8, no. 12. P. 1566. <https://doi.org/10.3390/pr8121566>.
26. Varadavenkatesan T., Vinayagam R., Selvaraj R. Structural characterization of silver nanoparticles phyto-mediated by a plant waste, seed hull of *Vigna mungo* and their biological applications // Journal of Molecular Structure. 2017. Vol. 1147. P. 629–635. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.07.002>.
27. Annegowda H. V., Majumder P. Valuable bioactives from vegetable wastes // Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products. 2021. P. 83–109. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824044-1.00003-9>.
28. Pandit S., Savla N., Sonawane J. M., Sani A. M., Gupta P. K., Mathuriya A. S., et al. Agricultural waste and wastewater as feedstock for bioelectricity generation using microbial fuel cells: recent advances // Fermentation. 2021. Vol. 7, no. 3. P. 169. <https://doi.org/10.3390/fermentation7030169>.
29. Javed M. M., Nisar M. A., Ahmad M. U. Effect of NaCl and pH on bioelectricity production from vegetable waste extract supplemented with cane molasses in dual chamber microbial fuel cell // Pakistan Journal of Zoology. 2021. Vol. 54, no. 1. P. 247–254. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.pjz/20180611050622>.
30. Chandra M. S., Srinivasulu M., Yadav P. S., Ramesh B., Narasimha G., Chandrasekhar T. Value added products from agriculture, paper and food waste: a source of bioenergy production. In: Clean Energy Production Technologies. Srivastava M., Srivastava N., Singh R. (eds.). Singapore: Springer, 2021. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1190-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1190-2_3).
31. Zhdanova G. O., Konovalova E. Yu., Tolstoy M. Yu., Kashevsky A. V., Barbora L., Goswami P., et al. Comparative analysis of electrogenic activity of complex microbial preparations in microbial fuel cells // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 272, no. 3. P. 032161. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032161>.
32. Rudenko R. R., Vasilevich E. E., Zhdanova G. O., Chizhick K. I., Topchiy I. A., Stom D. I. The use of urban sewage sludge as a substrate in a microbial fuel cell // International Journal of Engineering & Technology. 2018. Vol. 7, no. 2. P. 277–280. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11931>.
33. Коркина О. С., Сарапулова Г. И., Жданова Г. О., Горбунова Ю. О., Иванчиков Е. А., Стом Д. И. [и др.]. Микробиологический препарат «Доктор Робик 109» как биоагент для получения электрического тока в МТЭ при добавлении жиров // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Биология. Экология. 2019. Т. 28. С. 17–25. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2019.28.17>.
34. Stom D. I., Zhdanova G. O., Kashevskii A. V. New designs of biofuel cells and their work testing // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 262. P. 012219. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012219>.
35. Grigorova R., Norris J. R. Methods in microbiology. Academic Press, 1990. Vol. 22. 618 p.
36. Kaur M., Kumar M., Sachdeva S., Puri S. K. Aquatic weeds as the next generation feedstock for sustainable bioenergy production // Bioresource Technology. 2018. Vol. 251. P. 390–402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.082>.
37. Varanasi J. L., Kumari S., Das D. Improvement of energy recovery from water hyacinth by using integrated system // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43, no. 3. P. 1303–1318. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.110>.
38. Ndayisenga F., Yu Z., Kabera T., Wang B., Liang H., Phulpoto I. A., et al. Co-substrate facilitated

charge transfer for bioelectricity evolution in a toxic blue-green alga-fed microbial fuel cell technology // *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02173-1>.

39. Sani A. M., Savla N., Pandit S., Mathuriya A. S., Gupta P. K., Khanna N., et al. Recent advances in

bioelectricity generation through the simultaneous valorization of lignocellulosic biomass and wastewater treatment in microbial fuel cell // *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021. Vol. 48. P. 101572. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101572>.

## REFERENCES

1. Bhagowati B., Ahamad K. U. A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. *Ecohydrology & Hydrobiology*. 2019;19(1):155-166. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002>.

2. Kobanova G. I., Takhteev V. V., Rusanovskaya O. O., Timofeyev M. A. Lake Baikal ecosystem faces the threat of eutrophication. *International Journal of Ecology*. 2016;2016:1-8. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/6058082>.

3. Kai W. U., Xuzhou M. A., Youcheng W., Wu W., Yuelin L. Effect of three water plants decomposition on water quality. *Journal of Shanghai Ocean University*. 2016;25(5):726-734.

4. Tang J.-Y., Cao P.-P., Xu Ch., Liu M.-S. Effects of aquatic plants during their decay and decomposition on water quality. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao*. 2013;24(1):83-89.

5. Timoshkin O. A., Samsonov D. P., Yamamuro M., Moore M. V., Belykh O. I., Malnik V. V., et al. Rapid ecological change in the coastal zone of Lake Baikal (East Siberia): Is the site of the world's greatest freshwater biodiversity in danger? *Journal of Great Lakes Research*. 2016;42(3):487-497. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.02.011>.

6. Kravtsova L. S., Izhboldinalgor L. A., Khanaev I. V., Pomazkina G. V., Rodionova E. V., Domyshcheva V. M., et al. Nearshore benthic blooms of filamentous green algae in Lake Baikal. *Journal of Great Lakes Research*. 2014;40(2):441-448. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2014.02.019>.

7. Khanaev I. V., Kravtsova L. S., Maikova O. O., Bukshuk N. A., Sakirko M. V., Kulakova N. V., Butina T. V., et al. Current state of the sponge fauna (Porifera: Lubomirskiidae) of Lake Baikal: Sponge disease and the problem of conservation of diversity. *Journal of Great Lakes Research*. 2018;44(1):77-85. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2017.10.004>.

8. Malaviya P., Singh A., Anderson T. A. Aquatic phytoremediation strategies for chromium removal. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*. 2020;19:897-944. <https://doi.org/10.1007/s11157-020-09552-y>.

9. Delgado-González C. R., Madariaga-Navarrete A., Fernández-Cortés J. M., Islas-Pelcastre M., Oza G., Iqbal H. M. N., et al. Advances and applications of water phytoremediation: a potential biotechnological approach for the treatment of heavy metals from contaminated water. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021;18(10):5215. <https://doi.org/10.3390/ijerph18105215>.

10. Jeevanantham S., Saravanan A., Hemavathy R. V., Senthil Kumar P., Yaashikaa P. R., Yuvaraj D. Removal of toxic pollutants from water envi-

ronment by phytoremediation: A survey on application and future prospects. *Environmental Technology & Innovation*. 2019;13:264-276. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2018.12.007>.

11. Kathi S. Chapter 6 – Bioenergy from phytoremediated phytomass of aquatic plants via gasification. *Bioremediation and Bioeconomy*. 2016:111-128. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802830-8.00006-X>.

12. Rezanian S., Park J., Rupani P. F., Darajeh N., Xu X., Shahrokhishahraki R. Phytoremediation potential and control of *Phragmites australis* as a green phytomass: an overview. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26:7428-7441. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04300-4>.

13. Castillo-Llamas A. D., del Río P. G., Pérez-Pérez A., Yáñez R., Garrote G., Gullón B. Recent advances to recover value-added compounds from avocado by-products following a biorefinery approach. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. 2021;28:100433. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100433>.

14. Abdel-Shafy H. I., Mansour M. S. M. Solid waste issue: sources, composition, disposal, recycling, and valorization. *Egyptian Journal of Petroleum*. 2018;27(4):1275-1290. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2018.07.003>.

15. Saravanan A., Kumar P. S., Khoo K. Sh., Show P.-L., Carolin C. F., Jackulin C. F., et al. Biohydrogen from organic wastes as a clean and environment-friendly energy source: Production pathways, feedstock types, and future prospects. *Biorenewable Technology*. 2021;126021. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126021>.

16. da Silva Mazareli R. C., Montoya A. C. V., Delforno T. P., Centurion V. B., de Oliveira V. M., Silva E. L., et al. Enzymatic routes to hydrogen and organic acids production from banana waste fermentation by autochthonous bacteria: optimization of pH and temperature. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021;46(12):8454-8468. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.12.063>.

17. Baibakova O. V. Chemicoenzymatic conversion of cereal crop residues into bioethanol. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biokhimiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2016;6(2):51-56. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-2-51-56>.

18. Ledesma B., Beltramone A. Revalorization of agro-industrial waste as a catalyst source for production of biofuels. *Renewable Energy*. 2021;174:747-757. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.131>.

19. Zanivan J., Bonatto C., Scapini T., Dalastra C., Bazoti S. F., Júnior S. L. A., et al. Evaluation of bio-

ethanol production from a mixed fruit waste by *Wickerhamomyces* sp. UFFS-CE-3.1.2. *BioEnergy Research*. 2021;1-8. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10273-5>.

20. Reshmy R., Philip E., Madhavan A., Sindhu R., Binod P., Balakumaran P. A., et al. Potential utilisation of fruit and vegetable waste: an overview. *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products*. 2021:179-191. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7_9).

21. Shrestha S., Khatiwada J. R., Sharma H. K., Qin W. Bioconversion of fruits and vegetables wastes into value-added products. *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products*. 2021:145-163. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7_9).

22. Mehmood T., Nadeem F., Qamar S. A., Bilal M., Iqbal H. M. N. Bioconversion of agro-industrial waste into value-added compounds. *Sustainable Bioconversion of Waste to Value Added Products*. 2021:349-368. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61837-7_22).

23. Santhi V. P., Sriramavaratharajan V., Murugan R., Masilamani P., Gurav Sh. S., Sarasu V. P., et al. Edible fruit extracts and fruit juices as potential source of antiviral agents: a review. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2021;15:5181-5190. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-01090-7>.

24. Abari A. H., Rourani H. A., Ghasemi S. M., Kim H., Kim Y.-G. Investigation of antioxidant and anticancer activities of unsaturated oligo-galacturonic acids produced by pectinase of *Streptomyces hydrogenans* YAM1. *Scientific Reports*. 2021;11. Article number 8491. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87804-9>.

25. Lizárraga-Velázquez C. E., Leyva-López N., Hernández C., Gutiérrez-Grijalva E. P., Salazar-Leyva J. A., Osuna-Ruiz I., et al. Antioxidant molecules from plant waste: extraction techniques and biological properties. *Processes*. 2020;8(12):1566. <https://doi.org/10.3390/pr8121566>.

26. Varadavenkatesan T., Vinayagam R., Selvaraj R. Structural characterization of silver nanoparticles phyto-mediated by a plant waste, seed hull of *Vigna mungo* and their biological applications. *Journal of Molecular Structure*. 2017;1147:629-635. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.07.002>.

27. Annegowda H. V., Majumder P. Valuable bioactives from vegetable wastes. *Valorization of Agri-Food Wastes and By-Products*. 2021:83-109. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824044-1.00003-9>.

28. Pandit S., Savla N., Sonawane J. M., Sani A. M., Gupta P. K., Mathuriya A. S., et al. Agricultural waste and wastewater as feedstock for bioelectricity generation using microbial fuel cells: recent advances. *Fermentation*. 2021;7(3):169. <https://doi.org/10.3390/fermentation7030169>.

29. Javed M. M., Nisar M. A., Ahmad M. U. Effect of NaCl and pH on bioelectricity production from vegetable waste extract supplemented with cane molasses in dual chamber microbial fuel cell. *Pakistan Journal of Zoology*. 2021;54(1):247-254. <https://dx.doi.org/10.17582/journal.pjz/20180611050622>.

30. Chandra M. S., Srinivasulu M., Yadav P. S., Ramesh B., Narasimha G., Chandrasekhar T. Value added products from agriculture, paper and food waste: a source of bioenergy production. In: *Clean Energy Production Technologies*. Srivastava M., Srivastava N., Singh R. (eds.). Singapore: Springer; 2021. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-1190-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-981-16-1190-2_3).

31. Zhdanova G. O., Konovalova E. Yu., Tolstoy M. Yu., Kashevsky A. V., Barbora L., Goswami P., et al. Comparative analysis of electrogenic activity of complex microbial preparations in microbial fuel cells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;272(3):032161. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/3/032161>.

32. Rudenko R. R., Vasilevich E. E., Zhdanova G. O., Chizhick K. I., Topchiy I. A., Stom D. I. The use of urban sewage sludge as a substrate in a microbial fuel cell. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018;7(2):277-280. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i2.23.11931>.

33. Korkina O. S., Sarapulova G. I., Zhdanova G. O., Gorbunova Yu. O., Ivanchikov E. A., Stom D. I., et al. Microbiological preparation "Doctor Roebic 109" as a bioagent for obtaining electrical current in MFC with the addition of fats. *Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Biologiya. Ekologiya = The Bulletin of Irkutsk State University. Series Biology. Ecology*. 2019;28:17-25. (In Russian). <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2019.28.17>.

34. Stom D. I., Zhdanova G. O., Kashevskii A. V. New designs of biofuel cells and their work testing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;262:012219. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012219>.

35. Grigorova R., Norris J. R. *Methods in microbiology*. Academic Press; 1990. Vol. 22. 618 p.

36. Kaur M., Kumar M., Sachdeva S., Puri S. K. Aquatic weeds as the next generation feedstock for sustainable bioenergy production. *Bioresource Technology*. 2018;251:390-402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.11.082>.

37. Varanasi J. L., Kumari S., Das D. Improvement of energy recovery from water hyacinth by using integrated system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018;43(3):1303-1318. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.110>.

38. Ndayisenga F., Yu Z., Kabera T., Wang B., Liang H., Phulpoto I. A., et al. Co-substrate facilitated charge transfer for bioelectricity evolution in a toxic blue-green alga-fed microbial fuel cell technology. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02173-1>.

39. Sani A. M., Savla N., Pandit S., Mathuriya A. S., Gupta P. K., Khanna N., et al. Recent advances in bioelectricity generation through the simultaneous valorization of lignocellulosic biomass and wastewater treatment in microbial fuel cell. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2021;48:101572. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101572>.

**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Д. И. Стом,**

д.б.н., профессор,  
заведующий лабораторией водной  
токсикологии,  
Иркутский государственный университет,  
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,  
Российская Федерация;  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация;  
главный научный сотрудник,  
Байкальский музей СО РАН,  
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,  
Российская Федерация,  
stomd@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

**Г. О. Жданова,**

научный сотрудник,  
Иркутский государственный университет,  
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,  
Российская Федерация,  
zhdanova86@ya.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-8355-9517>

**Н. Ю. Юдина,**

к.х.н., старший научный сотрудник,  
Тульский государственный университет,  
300012, г. Тула, пр-т Ленина, 92,  
Российская Федерация,  
tysia21-05-90@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4054-9642>

**С. В. Алферов,**

к.х.н., заведующий лабораторией,  
Тульский государственный университет,  
300012, г. Тула, пр-т Ленина, 92,  
Российская Федерация,  
chem@tsu.tula.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5217-7815>

**А. Н. Чеснокова,**

к.х.н., доцент,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
chesnokova@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-0326-7224>

**М. Ю. Толстой,**

к.т.н., доцент, заведующий кафедрой  
инженерных коммуникаций  
и систем жизнеобеспечения,  
директор инновационного  
центра «Энергоэффективность»,  
научный руководитель лаборатории качества

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**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;  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
Russian Federation;  
Chief Researcher,  
Baikal Museum of the SB RAS,  
1, Academicheskaya St., Listvyanka, 664520,  
Russian Federation,  
stomd@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

**Galina O. Zhdanova,**

Researcher,  
Irkutsk State University,  
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation,  
zhdanova86@ya.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-8355-9517>

**Natalia Yu. Yudina,**

Cand. Sci. (Chemistry), Researcher,  
Tula State University,  
92, Lenin Ave., Tula, 300012,  
Russian Federation,  
tysia21-05-90@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-4054-9642>

**Sergey V. Alferov,**

Cand. Sci. (Chemistry), Head of the Laboratory,  
Tula State University,  
92, Lenin Ave., Tula, 300012,  
Russian Federation,  
chem@tsu.tula.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5217-7815>

**Alexandra N. Chesnokova,**

Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
Russian Federation,  
chesnokova@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-0326-7224>

**Mikhail Yu. Tolstoy,**

Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,  
Head of the Department of Engineering  
Communications and Life Support Systems,  
Director of the Energy Efficiency Innovation  
Center,  
Scientific Director of the Water Quality

воды,  
Иркутский национальный  
исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
tolstoi@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-1573-060X>

**А. Б. Купчинский,**  
к.б.н., директор,  
Байкальский музей СО РАН,  
664520, п. Листвянка, ул. Академическая, 1,  
Российская Федерация,  
albor67@mail.ru  
bm@isc.irk.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8884-8636>

**М. Н. Саксонов,**  
к.б.н., старший научный сотрудник,  
Иркутский государственный университет,  
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,  
Российская Федерация,  
msaksonov@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0094-2447>

**С. А. Закарчевский,**  
аспирант,  
Иркутский национальный  
исследовательский технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
Российская Федерация,  
serzh94lan@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5384-1992>

**Т. Энхдул,**  
кандидат наук, доцент,  
Монгольский государственный университет,  
210646, г. Улан-Батор, ул. Университетская, 1,  
Монголия,  
enkhdul@seas.num.edu.mn  
enkhdult@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-6147-2130>

**А. Францетти,**  
доктор наук, доцент кафедры наук о Земле  
и окружающей среде,  
Миланский университет Бикокка,  
20126, г. Милан, Piazza della Scienza, 1, Италия,  
andrea.franzetti@unimib.it  
<https://orcid.org/0000-0003-1279-9940>

**М. Рахимнеджад,**  
доктор наук, профессор кафедры  
химического машиностроения,  
Технологический университет  
Бабола Ноширвани,  
а/я: 484, г. Баболь, ул. Шариати, Иран,  
Rahimnejad@nit.ac.ir  
Rahimnejad\_mostafa@yahoo.com

Laboratory,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
Russian Federation,  
tolstoi@istu.edu  
<https://orcid.org/0000-0002-1573-060X>

**Alexander B. Kupchinsky,**  
Cand. Sci. (Biology), Director,  
Baikal Museum of the SB RAS,  
1, Academicheskaya St., Listvyanka, 664520,  
Russian Federation,  
albor67@mail.ru  
bm@isc.irk.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8884-8636>

**Mikhail N. Saksonov,**  
Cand. Sci. (Biology), Researcher,  
Irkutsk State University,  
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,  
Russian Federation,  
msaksonov@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0094-2447>

**Sergey A. Zakarchevskiy,**  
Postgraduate Student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074,  
Russian Federation,  
serzh94lan@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-5384-1992>

**Tuugu Enkhdul,**  
PhD, Associate Professor,  
Mongolian State University,  
1, University St., 210646, Ulaanbaatar,  
Mongolia,  
enkhdul@seas.num.edu.mn  
enkhdult@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0001-6147-2130>

**Andrea Franzetti,**  
PhD, Associate Professor,  
Department of Earth and Environmental  
Sciences,  
University of Milano – Bicocca,  
1, Piazza della Scienza, 20126, Milano, Italy,  
andrea.franzetti@unimib.it  
<https://orcid.org/0000-0003-1279-9940>

**Mostafa Rahimnejad,**  
PhD, Professor,  
Department of Chemical Engineering,  
Babol Noshirvani University of Technology,  
Shariati St., P.O. Box: 484, Babol, Iran,  
Rahimnejad@nit.ac.ir  
Rahimnejad\_mostafa@yahoo.com  
Rahimnejad\_mostafa@gmail.com

Rahimnejad.mostafa@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-3582-5876>

<https://orcid.org/0000-0002-3582-5876>

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

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

**Информация о статье**

*Поступила в редакцию 07.06.2021.  
Одобрена после рецензирования 15.02.2022.  
Принята к публикации 28.02.2022.*

**Information about the article**

*The article was submitted 07.06.2021.  
Approved after reviewing 15.02.2022.  
Accepted for publication 28.02.2022.*