

Оригинальная статья / Original article

УДК 628.355.2; 573.6

<http://dx.doi.org/10.21285/2227-2925-2019-9-3-477-488>

Возможность оценки работоспособности активного ила очистных сооружений с помощью биотопливных элементов

© Д.И. Стом^{*,**}, Г.О. Жданова^{*}, М.Н. Саксонов^{*}, Л. Барбора^{***}, Б. Се^{****},
Ю.О. Горбунова^{*,**}, В.А. Фиалков^{**}, А.Б. Купчинский^{**}, В.Н. Бешков^{*****}

* Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

** Байкальский музей Иркутского научного центра, п. Листвянка, Иркутская обл., Российская Федерация

*** Индийский институт технологий Гувахати, штат Ассам, Индия

**** Бэйханский университет, г. Пекин, Китай

***** Институт инженерной химии Болгарской академии наук, г. София, Болгария

Резюме: Авторами настоящей статьи исследована зависимость между способностью активного ила городских канализационных очистных сооружений г. Иркутск генерировать электрический ток в биотопливных элементах (БТЭ) и его иловым индексом, дегидрогеназной активностью, скоростью элиминирования активным илом глюкозы и ионов аммония. Электрогенную активность ила исследовали в двухкамерных конструкциях БТЭ. Камеры БТЭ были разделены между собой протонообменной мембраной МФ-4СК (ЗАО «Пластполимер», г. Санкт-Петербург). Отбор проб ила осуществляли при помощи стерильного шприца через специальную резиновую заглушку в боковой части анодной камеры. Предложенная модификация ячейки позволяет осуществлять отбор проб или внесение субстратов и биоагентов без нарушения анаэробных условий в анолите. Электродами в исследуемых БТЭ служила углеродная ткань Урал Т-22Р А (ОАО «СветлогорскХимволокно», Республика Беларусь). Активный ил подвергали температурной обработке – нагревали в течение 5, 10 и 15 мин при 80 °С, а также инактивировали автоклавированием при 1 атм в течение 30 мин (120 °С). Иловый индекс определяли стандартным методом по соотношению дозы ила по объему и массе. Дегидрогеназную активность ила оценивали по восстановлению 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида. С применением фотометрических методов исследовали динамику элиминирования активным илом глюкозы (по восстановлению 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида) и аммония (с реактивом Несслера). Обработка ила повышенной температурой и инактивация ила автоклавированием негативно сказывались на электрических параметрах БТЭ на основе ила и скорости трансформации им субстратов – глюкозы и аммонийного азота. Определена электрогенная активность в БТЭ проб ила, отобранных из разных аэротенков, отличающихся друг от друга по показателям илового индекса и дегидрогеназной активности. Показано наличие прямой зависимости между исследуемыми параметрами, что позволило предложить использовать биотопливные элементы для экспрессной оценки физиологического состояния и работоспособности активного ила.

Ключевые слова: биотопливные элементы, активный ил, очистные сооружения, электрогенная активность, биоагент, оценка состояния ила

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект RFMEFI58317X0060 «Биоремедиация и биоконверсия отходов с помощью комплекса фотосинтетических организмов и гетеротрофов в аэробных и анаэробных условиях с генерированием биоэнергии»).

Авторы признательны за участие в проведении исследований к.т.н. Э.Э. Василевич, студентам и аспирантам Е.С. Чернухе, А.В. Приловскому, Р.Т. Камалову, за фотографию биотопливного элемента – С.И. Дидоренко.

Информация о статье: Дата поступления 7 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 5 сентября 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

Для цитирования: Стом Д.И., Жданова Г.О., Саксонов М.Н., Барбора Л., Се Б., Горбунова Ю.О., Фиалков В.А., Купчинский А.Б., Бешков В. Возможность оценки работоспособности активного ила очистных сооружений с помощью биотопливных элементов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2019. Т. 9, N 3. С. 477–488. DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-477-488

Application of biofuel cells in state assessment of activated sludge from treatment plants

© Devard I. Stom^{*,**}, Galina O. Zhdanova^{*}, Mikhail N. Saksonov^{*},
Lepakshi Barbora^{***}, Beizhen Xie^{****}, Julia O. Gorbunova^{*,**},
Vladimir A. Fialkov^{**}, Alexander B. Kupchinsky^{**}, Venko N. Beschkov^{*****}

^{*} Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

^{**} Baikal Museum of the ISC, Listvyanka, Irkutsk Region, Russian Federation

^{***} Indian Institute of Technology Guwahati, Assam, India

^{****} Beijing University, Beijing, China

^{*****} Institute of Chemical Engineering (IChE), Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

Abstract: The authors investigate the sludge index, dehydrogenase activity and elimination rate for glucose and ammonium ions in activated sludge obtained from urban sewage in treatment plants in the city of Irkutsk to determine the relationship between the factors and the ability to generate an electric current in biofuel cells (BFC). A two-chamber BFC design was used to examine the electrogenic activity of sludge. BFC chambers were separated by a MF-4SK (Plastpolymer CJSC, St. Petersburg) proton-exchange membrane. Sludge sampling was carried out using a sterile syringe inserted through a specially-designed rubber plug in the side of the anode chamber. The proposed cell modification provides sampling or substrate and bioagent dosing without disturbing anaerobic conditions in the anolyte. The Ural T-22R A carbon fabric (SvetlogorskKhimvolokno OJSC, Republic of Belarus) material was used for the electrodes in the BFC under study. Activated sludge was subjected to heat treatment for 5, 10 and 15 min at 80 °C. Inactivation was additionally performed by autoclaving at 1 atm for 30 min (120 °C). The sludge index was determined by the standard method for calculating the volume and weight ratio of sludge. The sludge dehydrogenase activity was evaluated by the reduction of 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride. The dynamics of sludge elimination for glucose (by the reduction of 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride) and ammonium (by Nessler's reagent) was studied using photometric methods. As a result, sludge heating and autoclave inactivation negatively affected the electrical parameters of sludge-based BFC and the sludge elimination rate for glucose and ammonium nitrogen. The electrogenic activity in BFC was determined for sludge sampled from aerotanks having varying sludge index and dehydrogenase activity values. A direct relationship between the studied parameters is indicated, providing for the application of biofuel cells for the rapid assessment of the physiological state and efficiency of activated sludge.

Keywords: biofuel cells, activated sludge, treatment facilities, electrogenic activity, bioagent, sludge state assessment

Acknowledgements: This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project RFMEFI58317X0060 "Bioremediation and bioconversion of waste using a complex of photo-synthetic organisms and heterotrophs in aerobic and anaerobic conditions with bioenergy generation"). The authors are grateful to Ph.D. E.E. Vasilevich, to students and post-graduate students E.S. Chernukha, A.V. Prilovskii, R.T. Kamalov for their participation in the research. The authors are also thankful to S.I. Didorenko for the photograph of a biofuel element.

Information about the article: Received February 7, 2019; accepted for publication September 5, 2019; available online September 30, 2019.

For citation: Stom D. I., Zhdanova G. O., Saksonov M. N., Barbora L., Xie B., Gorbunova Yu. O., Fialkov V. A., Kupchinsky A. B., Beschkov V. Possibility to evaluate the working capacity of active sludge cleaning plants with the help of biofuel elements. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2019, vol. 9, no. 3, pp. 477–488. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2019-9-3-477-488

ВВЕДЕНИЕ

Основным звеном биологической очистки сточных вод является активный ил. Определяющую роль в нем играет комплекс микроорганизмов, поскольку именно они отвечают за трансформацию компонентов сточных вод. Рабо-

способность активного ила очистных сооружений зависит от его возраста, качественного и количественного состава сточных вод, разнообразия форм и видов микроорганизмов и др. [1–4]. Негативное воздействие на ил могут оказывать загрязнители сточных вод, недостаток кисло-

рода, изменение pH и другие факторы. Ухудшение физиологического состояния и снижение биохимической активности ила отрицательно сказываются на очистке им сточных вод [5–7]. Поэтому для эффективной работы очистных сооружений необходим непрерывный контроль физиологического состояния активного ила. При этом для оперативного управления процессами очистки желательна экспрессная оценка работоспособности ила.

При оценке качества ила наиболее часто применяется показатель илового индекса [8–11]. Однако этот прием не позволяет прямо судить о способности активного ила трансформировать конкретные компоненты сточных вод. Важным параметром ила, характеризующим его физиологическое состояние, является ферментативная активность. Предложено оценивать состояние ила по дегидрогеназной активности [12–16]. Но подобные определения не дают однозначного ответа. Действительно, повышение активности дегидрогеназ может быть, в частности, связано с гибелью микроорганизмов активного ила и освобождением ферментов из клеток. Кроме длительности проведения анализов выше приведенные методы не позволяют вести непрерывное наблюдение за активностью ила. Более того, практически отсутствуют методы оценки активности ила в анаэробных условиях.

Микроорганизмы активного ила в силу их многокомпонентности, имеют широчайший спектр субстратной специфичности. Имеются сообщения о том, что активный ил способен выступать в роли биоагента в биотопливных элементах (БТЭ) [17, 18]. Микробиоценозы активного ила характеризуются высокой метаболизирующей активностью. Участвуя в окислительно-восстановительных реакциях, микроорганизмы переносят электроны атомов молекул загрязняющих веществ на анод БТЭ. В связи с этим целью данного исследования явилась проверка возможности оценки состояния активного ила на его способность генерировать электрический ток в БТЭ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Биоагенты в БТЭ. В качестве биоагента в БТЭ брали активный ил городских канализационных очистных сооружений (КОС) г. Иркутск. В ходе лабораторных экспериментов активный ил инкубировали, аэрируя при помощи компрессоров Dezzie D-044 (КНР). В ил вносили глюкозу (0,5 г/л 1 раз в сутки).

Используемые материалы. Примененная в работе конструкция БТЭ содержит две камеры – анодную и катодную. Размеры камер – 140×125×50 мм. Биоэлектрохимическую ячейку изготавливали из оргстекла с толщиной стенок и дна 3 мм (PLEXIGLAS, Rohm Evonik GmbH). Крышки камер (толщина 6 мм) имели отверстия с резьбой для размещения в них электродов. Для разделения анодной и катодной камер

использовали протонобменную мембрану МФ-4СК (ЗАО «Пластполимер», г. Санкт-Петербург) толщиной 0,25±0,01 мм, удельное объемное электрическое сопротивление составляло не более 10,1 Ом·см. Мембрану укрепляли в прямоугольном окне между камерами, размер окна – 40×90 мм. В качестве электродов в работе использовали углеродную ткань Урал Т-22Р А (ОАО «СветлогорскХимволокно», Республика Беларусь). Перед началом работы обе камеры БТЭ стерилизовали 3%-ным раствором перекиси водорода в течение 20 мин. После этого каждый отсек БТЭ промывали стерильной водой, чтобы удалить остатки H₂O₂, и помещали под ультрафиолет на 15 мин.

Исследование электрогенной активности ила в БТЭ. Пробу ила со сточной водой вносили в анодную камеру БТЭ. При этом камеру заполняли до самого верха, что способствовало вытеснению воздуха из камеры. С этой же целью осуществляли продувку анолита аргоном. Основной рабочей средой в катодных камерах служила модельная сточная вода следующего состава, мг/л: Na₂CO₃ – 50; KH₂PO₄ – 25; CaCl₂ – 7,5; MgSO₄·7H₂O – 5; дистиллированная вода – 1 л [18]. Катодное пространство заполняли на 2–3 см ниже верхнего уровня отсека. Это позволяло аэрировать католит. За контроль брали БТЭ, в анодную и катодную камеру которых не добавляли микроорганизмы. Содержимое анодной камеры инкубировали без доступа кислорода. Католит, напротив, аэрировали при помощи лабораторных компрессоров Dezzie D-044. В обе камеры помещали электроды из углеродной ткани Урал Т-22Р А. Размеры электродов во всех экспериментах были одинаковыми и составляли 16×4 см. Субстратами для микроорганизмов активного ила служили пептон (0,5 г/л), глюкоза (1 г/л), аммоний хлористый (0,6 г/л).

Активный ил подвергали температурной обработке. Для этого его нагревали в течение 5, 10 и 15 мин при 80 °С. Ил инактивировали также автоклавированием при 1 атм в течение 30 мин (120 °С).

Отбор проб анолита для химического анализа осуществляли при помощи стерильного шприца через специальную резиновую заглушку в боковой части БТЭ (рис. 1). Такая модификация ячейки позволяет осуществлять отбор проб или внесение субстратов и биоагентов без нарушения анаэробных условий в анолите [19, 20].

Определение электрохимических параметров БТЭ. Измерение генерируемого напряжения проводили непрерывно в автоматическом режиме. Потенциал регистрировали при помощи системы, сконструированной на основе микропроцессорной платы Arduino Mega 2560 (микроконтроллер ATmega 2560), которая позволяла одновременно считывать данные с 16 БТЭ каждые 5 мин эксперимента. Силу тока регистрировали при помощи мультиметра DT-266 (КНР).

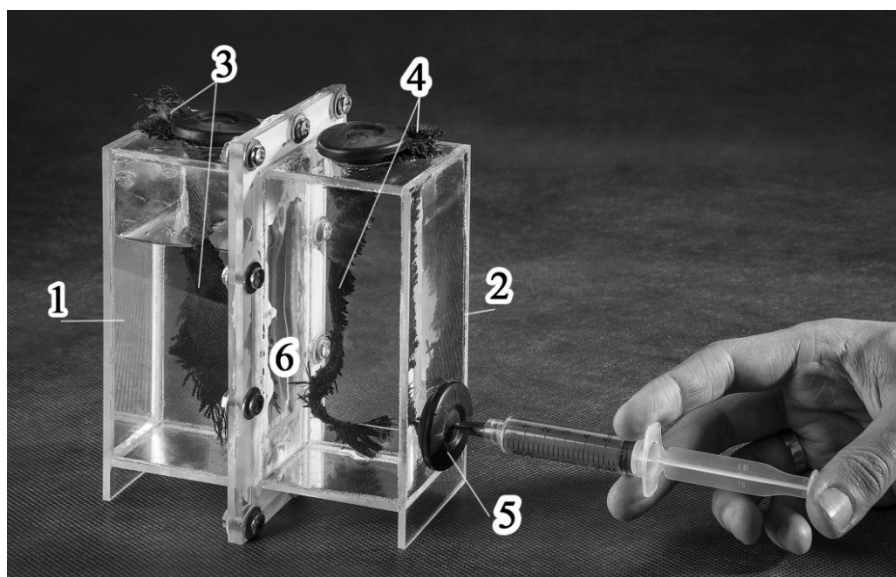


Рис. 1. Макет биотопливного элемента [1]: 1 – катодная камера, 2 – анодная камера, 3 – катодный электрод из углеродной ткани, 4 – анодный электрод из углеродной ткани, 5 – заглушка из полипропиленовой резины для отбора проб анолита, 6 – протонообменная мембрана МФ-4СК (ОАО «Пластполимер», РФ)

Fig. 1. Model of the biofuel element [1]: 1 – cathode chamber; 2 – anode chamber; 3 – carbon fabric cathode electrode; 4 – carbon fabric anode electrode; 5 – polypropylene rubber plug for anolyte sampling; 6 – proton exchange membrane MF-4SK (Plastpolymer OJSC, RF)

Иловый индекс (см³/г) определяли стандартным методом – по соотношению дозы ила по объему и дозы ила по массе [8–11]:

$$I = \frac{V}{q}.$$

Оценку дегидрогеназной активности ила проводили методом, основанным на восстановлении субстратов ферментами дегидрогеназами 2,3,5-трифенилтетразолия хлорида (ТТХ). В соответствии с известной методикой¹ активность ила определялась в условных единицах (усл. ед.) [21].

Исследование динамики элиминирования глюкозы активным илом. Для определения концентрации глюкозы в пробах активного ила использовали метод определения редуцирующих сахаров с 2,3,5-трифенилтетразолием хлоридом (ТТХ) [22]. В соответствии с методикой¹ предварительно отделяли редуцирующие сахара от активного ила путем центрифугирования проб и их фильтрования.

Динамику элиминирования аммонийного азота активным илом исследовали фотометрическим методом с реактивом Несслера [23]. Анализ проб проводили на спектрофотометре ПЭ-5300В.

Статистическую обработку экспериментальных данных осуществляли с использова-

нием пакета программ Microsoft Office. Все эксперименты проводили не менее чем в 5-и независимых опытах с 3 параллельными измерениями в каждом. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза $p \geq 0,95$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Влияние термического воздействия на электрогенную активность ила в БТЭ. При введении нативного ила в анолит за 4 суток инкубирования напряжение выросло до 576 мВ (рис. 2). Предварительно прогретый при 80 °С в течение 5 мин ил практически не давал существенного прироста электрических параметров – ЭДС не превышала 55 мВ. Ил, прогретый в течение 10 мин, в ходе 4-х суточного эксперимента не демонстрировал прироста электрических показателей; на 5 сутки наблюдали повышение напряжения до 532 мВ, однако сила тока при этом по-прежнему оставалась низкой – не более 41 мкА (рис. 3). После инактивирования ила автоклавированием (при 1 атм в течение 30 мин) генерирования напряжения не происходило (рис. 2).

¹ Методические рекомендации по определению дегидрогеназной активности при технологическом контроле за работой азротенков / М-во жил.-коммун. хоз-ва РСФСР, Акад. коммунал. хоз-ва им. К.Д. Памфилова. М., 1978. 8 с.

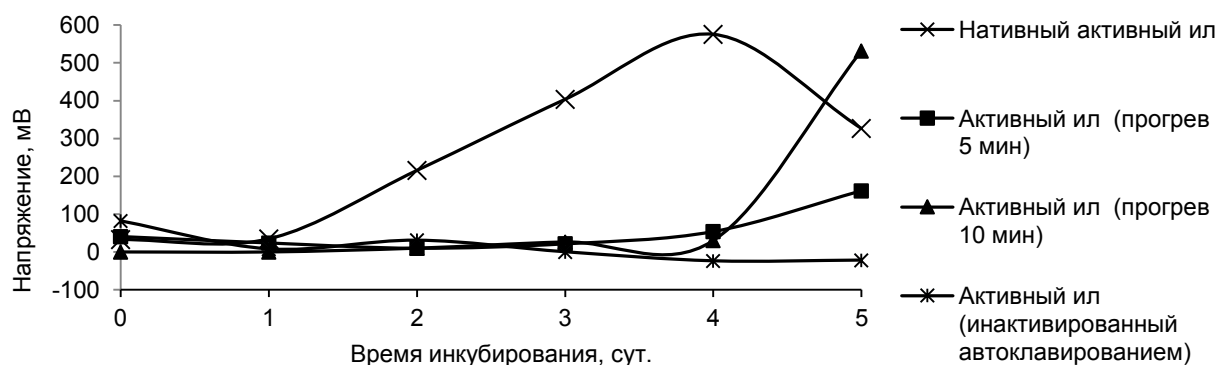


Рис. 2. Динамика напряжения, генерируемого в БТЭ активным илом очистных сооружений (среда – сточная вода из КОС г. Иркутск; электроды – углеродная ткань; субстрат – пептон 0,5 г/л; ил прогревали на водяной бане при 80 °С; контроль – ил автоклавированный при 120 °С при 1 атм в течение 30 мин)

Fig. 2. Dynamics of the voltage generated in BFC by activated sludge from sewage treatment plants (medium – wastewater from sewage treatment plants in Irkutsk; electrodes – carbon cloth; substrate – peptone 0.5 g / l; sludge was heated in a water bath at 80 °C; control – sludge autoclaved at 120 °C at 1 atm for 30 min)

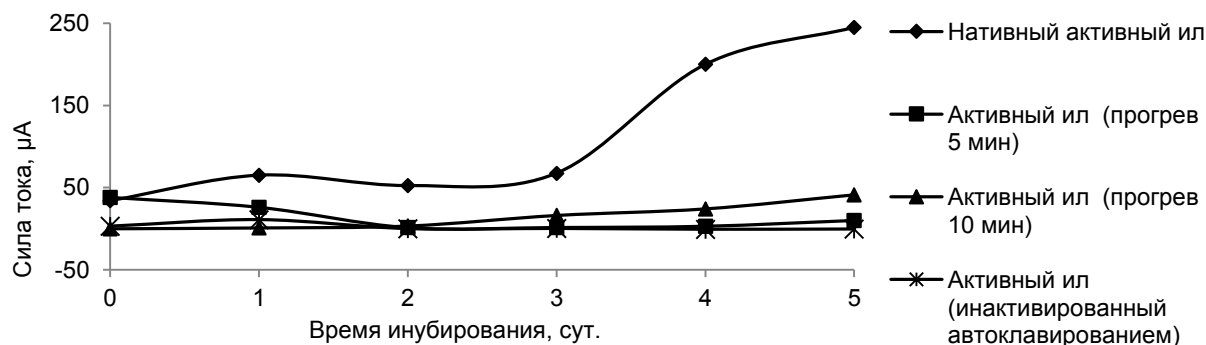


Рис. 3. Динамика силы тока, генерируемого в БТЭ активным илом очистных сооружений (среда – сточная вода из КОС г. Иркутск; электроды – углеродная ткань; субстрат – пептон 0,5 г/л; ил прогревали на водяной бане при 80 °С; контроль – ил автоклавированный при 120 °С при 1 атм в течение 30 мин; измерения в режиме короткого замыкания)

Fig. 3. Dynamics of the current generated in BFC by activated sludge from sewage treatment plants (medium – wastewater from sewage treatment plants in Irkutsk; electrodes – carbon cloth; substrate – peptone 0.5 g / l; sludge was heated in a water bath at 80 °C; control – sludge autoclaved at 120 °C at 1 atm for 30 min; measurements carried out in the short circuit mode)

Об активности исследуемых образцов ила судили и по скорости трансформации ими субстратов (ионов аммония и глюкозы) в анолите. Эксперименты показали, что наибольшая убыль аммония происходила в контрольном БТЭ с нативным илом. Уже в первые сутки инкубирования его количество снизилось в 1,7 раза. В ячейках с илом, прогретым при 80 °С в течение 10 мин, содержание аммония уменьшилось в 1,2 раза. Автоклавированный активный ил не повлиял на изменение концентрации аммония в среде. Это наглядно свидетельствует о снижении и последующей потере илом активности с увеличением времени его термической обработки и автоклавировании (табл. 1).

Аналогичный эксперимент проводили, используя в БТЭ глюкозу в качестве субстрата. Результаты показали следующее. Наиболее интенсивно глюкозу элиминировал нативный ил. В этом случае ее количество за сутки уменьшилось в 50 раз (с 1050 ± 22 до 19 ± 1 мг/л). В БТЭ с автоклавированным илом содержание глюкозы за 24 ч снизилось лишь в 2 раза (табл. 2). Активный ил, подвергнутый нагреванию в течение 10 мин, уменьшил количество глюкозы в 11 раз от исходного значения. При прогревании ила в течение 30 мин, уровень сахара упал лишь в 5,7 раза.

Таким образом, повышение времени термического воздействия на ил понижает его способность элиминировать глюкозу и аммонийный азот.

Таблица 1
 Влияние термической обработки активного ила на динамику трансформации
 аммонийного азота в модельной сточной воде

Table 1
 Effect of activated sludge heat treatment on ammonium nitrogen transformation
 in model wastewater

Вариант опыта	Количество NH_4^+ , мг/л	
	0 сут.	1 сут.
NH_4Cl (600 мг/л) + нативный активный ил	210±21	126±12
NH_4Cl (600 мг/л) + активный ил, нагретый в течение 10 мин при 80 °С		142±14
NH_4Cl (600 мг/л) + активный ил, нагретый в течение 30 мин при 80 °С		176±17
NH_4Cl (600 мг/л) + инактивированный активный ил (автоклавирование при 120 °С, 1 атм в течение 30 мин)		200±19

Таблица 2
 Влияние термической обработки активного ила на динамику трансформации
 глюкозы в модельной сточной воде

Table 2
 Effect of activated sludge heat treatment on glucose transformation in model wastewater

Вариант опыта	Концентрация глюкозы, мг/л	
	0 сут.	1 сут.
Глюкоза (1000 мг/л) + нативный активный ил	1050±22	19±1
Глюкоза (1000 мг/л) + активный ил, нагретый в течение 10 мин при 80 °С		94±2
Глюкоза (1000 мг/л) + активный ил, нагретый в течение 30 мин при 80 °С		185±9
Глюкоза (1000 мг/л) + инактивированный активный ил (автоклавирование при 120 °С, 1 атм в течение 30 мин)		537±14

Оценка электрогенной активности проб ила с различными показателями илового индекса и дегидрогеназной активности. В следующей серии опытов исследовали пробы ила из разных аэротенков КОС г. Иркутск (аэротенк 1 и 2). В период отбора проб ила на КОС проходили ремонтные работы, в связи с чем на аэротенк 2 приходился только один вторичный отстойник (по нормам на такой аэротенк должно быть два отстойника). Экспериментально установлено, что состояние активного ила из аэротенка 1 следует оценивать как хорошее. Параметры ила незначительно превышают предельные значения технологического регламента (значение илового индекса составило $162,5 \pm 9,9 \text{ см}^3/\text{г}$). Значение илового индекса образца активного ила, отобранного из аэротенка 2, в исследуемый период оказался выше нормы и составлял $546,3 \pm 91,9 \text{ см}^3/\text{г}$ (рис. 4). Это предположительно связано с ремонтными работами на КОС, из-за чего ил в аэротенке 2 находился в угнетенном состоянии.

Трудно ожидать строгого соответствия эффективности работы разных илов и их иловых индексов. Этот параметр является косвенным показателем. На иловый индекс большое влияние оказывает и соотношение БПК:N:P. Известно, что в норме на 100 мг/л БПК₂₀ должно приходиться 5 мг/л азота и 1 мг/л фосфора. При подобном соотношении удовлетворительно работающим илом считается тот, значение илового индекса которого находится в диапазоне от 80 до 120 $\text{см}^3/\text{г}^2$. При

старении ила и усилении минерализации иловый индекс становится менее 60 $\text{см}^3/\text{г}$. Значения илового индекса более 150 $\text{см}^3/\text{г}$ характеризуют вспухание ила. Подобные выводы являются лишь ориентировочными. Действительно, различные канализационные очистные сооружения имеют свои особенности и свои нормы по значениям илового индекса. Например, по имеющимся на исследуемых КОС г. Иркутска данным, поступавшие сточные воды содержали повышенную концентрацию азота и фосфора. В то же время показатель БПК в них был низок. Поэтому значение илового индекса нормально работающего активного ила на КОС г. Иркутска значительно превышали значения, указанные в соответствующей литературе.

Исследование дегидрогеназной активности ила выявило следующее. Из двух проб более активным оказался ил, отобранный из 1-го аэротенка. Его дегидрогеназная активность составляла $0,51 \pm 0,09$ усл. ед. В пробе ила из 2-го аэротенка наблюдали менее низкую активность дегидрогеназ – $0,08 \pm 0,02$ ед. (рис. 5). Следовательно, по значениям илового индекса и дегидрогеназной активности ил в пробе 1 оказался более работоспособным, чем в пробе 2.

² СП 32.13330.2012. Канализация. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 (с изменениями № 1, 2); утв. приказом Министерства регионального развития Российской Федерации (Минрегион России) от 29.12.2011 г. № 635/11, введен в действие с 01.01.2013 г.

Аналогичные закономерности прослеживались и при оценке электрогенной активности исследуемых проб активного ила. Так, ил из аэротенка 1 (проба 1) в течение 6 суток эксперимента генерировал ЭДС до 547 ± 38 мВ,

силу тока – до 514 ± 76 мкА. Это превышало показатели БТЭ с илом из пробы 2. Во втором случае максимальное напряжение достигало лишь 341 ± 74 мВ, сила тока – 203 ± 77 мкА (рис. 6, 7).

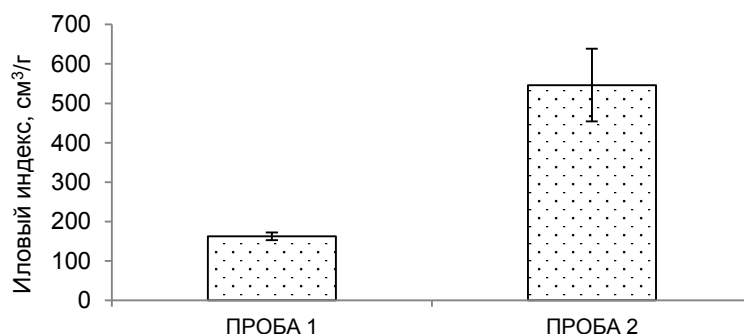


Рис. 4. Показатель илового индекса проб активного ила, отобранных из аэротенков 1 (проба 1) и 2 (проба 2) КОС г. Иркутск

Fig. 4. Sludge index of activated sludge samples taken from aeration tanks 1 (sample 1) and 2 (sample 2) of sewage treatment plants in Irkutsk

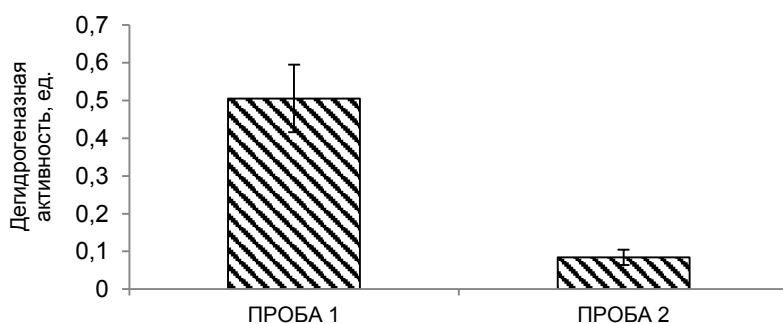


Рис. 5. Значения дегидрогеназной активности проб активного ила, отобранных из 1-го (проба 1) и 2-го (проба 2) аэротенков КОС г. Иркутск

Fig. 5. Dehydrogenase activity of activated sludge samples taken from the aeration tanks 1 (sample 1) and 2 (sample 2) of sewage treatment plants in Irkutsk

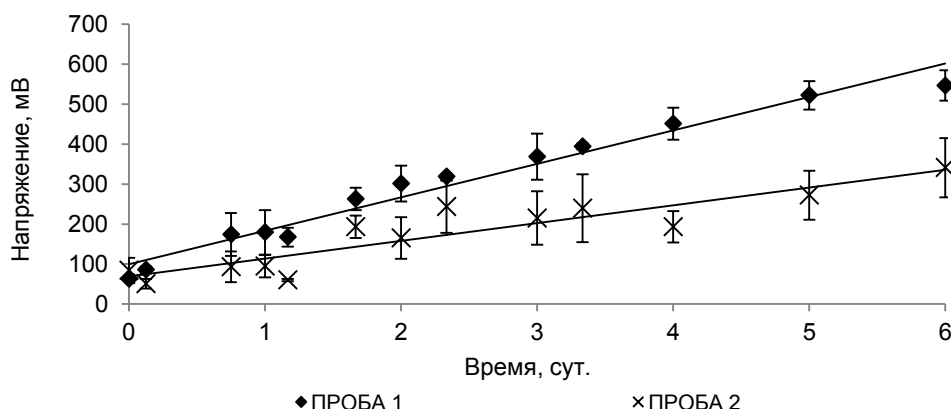


Рис. 6. Динамика напряжения, генерируемого активным илом в БТЭ (среда – сточная вода из КОС г. Иркутск; электроды – углеродная ткань; пробы ила отобраны из 1 (проба 1) и 2 (проба 2) аэротенков КОС г. Иркутск)

Fig. 6. Dynamics of the voltage generated by activated sludge in BFC (medium – wastewater from the sewage treatment plants in Irkutsk; electrodes – carbon cloth; sludge samples were taken from aeration tanks 1 (sample 1) and 2 (sample 2) of sewage treatment plants in Irkutsk)

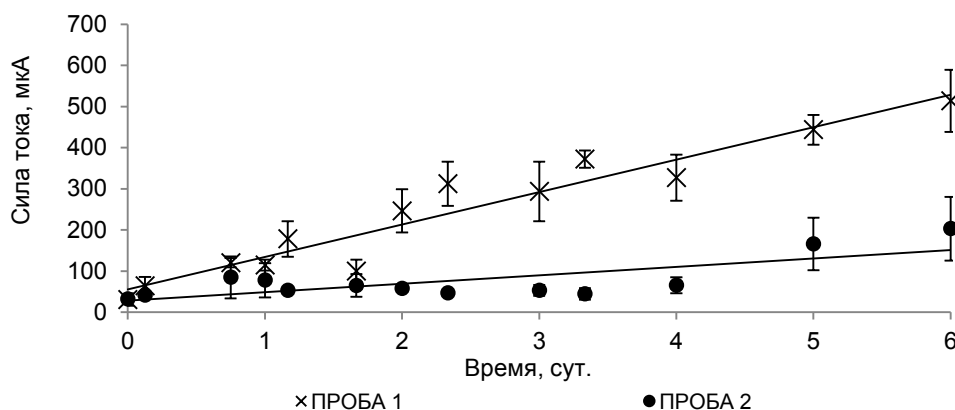


Рис. 7. Динамика силы тока, генерируемого активным илом в БТЭ
 (среда – сточная вода из КОС г. Иркутск, электроды – углеродная ткань,
 пробы ила отобраны из 1-го (проба 1) и 2-го (проба 2) аэротенков КОС г. Иркутск)

Fig. 7. Dynamics of current generated by activated sludge in BFC
 (medium – wastewater from sewage treatment plants in Irkutsk; electrodes – carbon cloth;
 sludge samples were taken from aeration tanks 1 (sample 1)
 and 2 (sample 2) of sewage treatment plants in Irkutsk)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подводя итог, следует отметить, что активный ил – это доступный высокоэффективный биоагент, включающий огромное количество самых различных микроорганизмов, которыми обусловлен его широчайший спектр субстратной специфичности. Поскольку микробиоценоз активного ила складывается в течение длительного времени естественным путем, и его компоненты адаптированы друг к другу, его состав довольно устойчив. Ил способен успешно конкурировать с посторонней микрофлорой.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что работоспособность активного ила можно объективно оценивать по электрическим показателям БТЭ при добавлении ила в анодное пространство. На биологических очистных сооружениях активный ил накапливается в огромных объемах, поэтому его использование в качестве биоагента в БТЭ позволяет хотя бы частично решить вопрос утилизации его избыточного коли-

чества. Таким образом БТЭ может позволить совмещать эффективную очистку сточных вод с одновременным генерированием электричества.

Описанные в работе модельные эксперименты свидетельствуют о роли микробиоценозов ила в процессе генерирования им электрического тока в БТЭ. Показано, что инактивация ила или термическое воздействие негативно сказывались на его электрогенной активности, снижали скорость элиминирования илом субстратов (глюкозы и аммонийного азота), а также уменьшали показатель илового индекса. При анализе электрогенной активности проб ила из разных аэротенков, отличающихся по значению илового индекса и дегидрогеназной активности, была отмечена прямая зависимость между исследуемыми показателями ила. Таким образом, полученные результаты позволяют предложить использование биотопливных элементов как объективного инструментального метода для оценки работоспособности активного ила.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mesut S. Variation of sludge volume index with activated sludge characteristics // *Water Research*. 1982. Vol. 16. Issue 1. P. 83–88. DOI: 10.1016/0043-1354(82)90056-2
2. Lovett D.A., Kavanagh B.V., Herbert L.S. Effect of sludge age and substrate composition on the settling and dewatering characteristics of activated sludge // *Water Research*. 1983. Vol. 17. Issue 11. P. 1511–1515. DOI: 10.1016/0043-1354(83)90006-4
3. Dilek S.F., Vatansever A., Turtin I., Kara F., Durmaz B., Sesay M.L. Operational conditions of activated sludge: Influence on flocculation and dewaterability // *Drying Technology*. 2006. Vol. 24. Issue 10. P. 1297–1306.
4. Cardete M.A., Mata-Álvarez J., Dosta J., Nieto-Sánchez R. Effect of the mixed liquor parameters on sludge settling for a petrochemical activated sludge system including an aerobic selector // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018. Vol. 6. Issue 1. P. 1062–1071. DOI: 10.1016/j.jece.2018.01.025
5. Chen R., Ren L.-F., Shao J., He Y., Zhang X. Changes in degrading ability, populations and metabolism of microbes in activated sludge in the treatment of phenol wastewater // *RSC Advances*. 2017. Vol. 7. Issue 83. P. 52841–52851. DOI: 10.1039/C7RA09225C
6. Mesdaghinia A., Ghahremani M.H., Nabizadeh R., Nasser S., Rafiee M. Role of COD PCP / COD Total ratio on p-chlorophenol toxicity towards aerobic

granular sludge // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2017. Vol. 54. P. 440–446. DOI: 10.1016/j.jiec.2017.06.025

7. Воротникова А.В., Турнаева Е.А. Влияние поверхностно-активных веществ на систему «активный ил – сточная вода» // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2018. Т.8. №3. С. 78–87. DOI: 10.21285/2227-2917-2018-3-78-87

8. Pedrazzani R., Menoni L., Nembrini S., Manili L., Bertanza G. Suitability of Sludge Biotic Index (SBI), Sludge Index (SI) and filamentous bacteria analysis for assessing activated sludge process performance: the case of piggery slaughterhouse wastewater // *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 2016. Vol. 43. Issue 7. P. 953–964. DOI: 10.1007/s10295-016-1767-1

9. Arregui L., Liébana R., Rodríguez E., Murciano A., Conejero F., Pérez-Uza B., Serrano S. Analysis of the usefulness of biological parameters for the control of activated sludge wastewater treatment plants in an interlaboratory study context // *Journal of Environmental Monitoring*. 2012. Vol. 14. Issue 5. P. 1444–1452. DOI: 10.1039/c2em10861e

10. Jin B., Wilén B.-M., Lant P. Impacts of morphological, physical and chemical properties of sludge flocs on dewaterability of activated sludge // *The Chemical Engineering Journal*. 2004. Vol. 98. Issues 1-2. P. 115–126. DOI: 10.1016/j.cej.2003.05.002

11. Kupchishin A.I., Niyazov M.N., Taipova B.G., Voronova N.A., Khodarina N.N. Study of the effect of electron irradiation on the density of the activated sludge in aqueous solution // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 289. No. 1. P. 012034. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012034

12. Bensaid A., Thierie J., Penninckx M. The use of the tetrazolium salt XTT for the estimation of biological activity of activated sludge cultivated under steady-state and transient regimes // *Journal of Microbiological Methods*. 2000. Vol. 40. Issue 3. P. 255–263. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00130-5](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00130-5)

13. Feng Q., Xiao Y., Li X., Xue Zh., Fang F., Cao J., Oleyiblo J. O., Hu Zh. Using the dehydrogenase activity for alert of activated sludge system under different copper concentrations // *Desalination and Water Treatment*. 2016. Vol. 57. Issue 38. P. 17836–17843. DOI: 10.1080/19443994.2015.1087339

14. Yan G., Cai B., Chen Ch., Wang Q., Guo Sh. Biodegradability evaluation of pollutants in acrylonitrile wastewaters based on particle size distribution // *Desalination and Water Treatment*. 2015. Vol. 53. Issue 10. P. 2792–2798. DOI: 10.1080/19443994.2014.931530

15. Yuan J., Dong W., Sun F., Zhao K., Du Ch.,

Shao Y. Bacterial communities and enzymatic activities in the vegetation-activated sludge process (V-ASP) and related advantages by comparison with conventional constructed wetland // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 220. P. 341–348.

16. Qian G., Li L., Hu X., Yu X., Ye L. Enhancement of the biodegradability of activated sludge by the electric-coagulation multistage A/O membrane bioreactor treating low C/N industrial wastewater // *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017. Vol. 125. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.08.004

17. Passos V.F., Aquino Neto S., Andrade A.R., Reginatto V. Energy generation in a Microbial Fuel Cell using anaerobic sludge from a wastewater // *Scientia Agricola*. 2016. Vol. 73. No. 5. P. 424–428. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0194>

18. Stom D.I., Konovalova E.Yu., Zhdanova G.O., Tolstoy M.Yu., Vyatchina O.F. Active sludge and strains isolated from it as bioagents in biofuel cells. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017 (27 June – 5 July, 2017). Bulgaria. 2017. Vol. 17. Issue 42. P. 19–26. DOI: 10.5593/sgem2017/42/S17.003

19. Пат. на полезную модель № 170868. Российская Федерация. Биоэлектрохимический элемент / А.Ф. Лашин, Н.Д. Борохоев, М.С. Красавцева, Д.И. Стом, О.Г. Жданова, М.Ю. Толстой; патентообладатель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»; заявл. 26.12.2016; опубл. 11.05.2017.

20. Пат. на полезную модель № 168093. Российская Федерация. Биоэлектрохимический элемент / Н.Д., Борохоев, Г.О. Жданова, В.М. Толстой, А.Э. Ржецкий; патентообладатель ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»; заявл. 05.07.2016; опубл. 18.09.2018.

21. Miksch K. Auswahl einer optimalen Methodik für die Aktivitätsbestimmung des Belebtschlammes mit Hilfe des TTC-Testes // *Vom Wasser*. 1985. Vol. 64. P. 187–198.

22. Fairbridge R.A., Willis K.J., Booth R.G. The direct colorimetric estimation of reducing sugars and other reducing substances with tetrazolium salts // *The Biochemical Journal*. 1951. Vol. 49. Issue 4. P. 423–427. DOI: 10.1042/bj0490423

23. Meseguer-Lloret S., Molins-Lagua C., Campins-Falco P. Ammonium Determination in Water Samples by Using Opa-Nac Reagent: A Comparative Study with Nessler and Ammonium Selective Electrode Methods // *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2002. Vol. 82. Issue 7. P. 475–489. DOI: 10.1080/0306731021000018107

REFERENCES

1. Mesut S. Variation of sludge volume index with activated sludge characteristics. *Water Research*. 1982, vol. 16, issue 1, pp. 83–88. DOI: 10.1016/0043-1354(82)90056-2

2. Lovett D.A., Kavanagh B.V., Herbert L.S. Effect of sludge age and substrate composition on the settling and dewatering characteristics of activated

sludge. *Water Research*. 1983, vol. 17, issue 11, pp. 1511–1515. DOI: 10.1016/0043-1354(83)90006-4

3. Dilek S.F., Vatansever A., Turtin I., Kara F., Durmaz B., Sesay M.L. Operational conditions of activated sludge: Influence on flocculation and dewaterability. *Drying Technology*. 2006, vol. 24, issue 10, pp. 1297–1306.

4. Cardete M.A., Mata-Álvarez J., Dosta J., Nieto-Sánchez R. Effect of the mixed liquor parameters on sludge settling for a petrochemical activated sludge system including an aerobic selector. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2018, vol. 6, issue 1, pp. 1062–1071. DOI: 10.1016/j.jece.2018.01.025
5. Chen R., Ren L.-F., Shao J., He Y., Zhang X. Changes in degrading ability, populations and metabolism of microbes in activated sludge in the treatment of phenol wastewater. *RSC Advances*. 2017, vol. 7, issue 83, pp. 52841–52851. DOI: 10.1039/C7RA09225C
6. Mesdaghinia A., Ghahremani M.H., Nabizadeh R., Nasser S., Rafiee M. Role of COD PCP / COD Total ratio on p-chlorophenol toxicity towards aerobic granular sludge. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2017, vol. 54, pp. 440–446. DOI: 10.1016/j.jiec.2017.06.025
7. Vorotnikova A.V., Turnaeva E.A. Effect of surface-active substances on an activated sludge wastewater system. *Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2018, vol. 8, no. 3, pp. 78–87. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2917-2018-3-78-87
8. Pedrazzani R., Menoni L., Nembrini S., Manili L., Bertanza G. Suitability of Sludge Biotic Index (SBI), Sludge Index (SI) and filamentous bacteria analysis for assessing activated sludge process performance: the case of piggy slaughterhouse wastewater. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*. 2016, vol. 43, issue 7, pp. 953–964. DOI: 10.1007/s10295-016-1767-1
9. Arregui L., Liébana R., Rodríguez E., Murciano A., Conejero F., Pérez-Uza B., Serrano S. Analysis of the usefulness of biological parameters for the control of activated sludge wastewater treatment plants in an interlaboratory study context. *Journal of Environmental Monitoring*. 2012, vol. 14, issue 5, pp. 1444–1452. DOI: 10.1039/c2em10861e
10. Jin B., Wilén B.-M., Lant P. Impacts of morphological, physical and chemical properties of sludge flocs on dewater ability of activated sludge. *The Chemical Engineering Journal*. 2004, vol. 98, issues 1–2, pp. 115–126. DOI: 10.1016/j.cej.2003.05.002
11. Kupchishin A.I., Niyazov M.N., Taipova B.G., Voronova N.A., Khodarina N.N. Study of the effect of electron irradiation on the density of the activated sludge in aqueous solution. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018, vol. 289, no. 1, pp. 012034. DOI: 10.1088/1757-899X/289/1/012034
12. Bensaid A., Thierie J., Penninckx M. The use of the tetrazolium salt XTT for the estimation of biological activity of activated sludge cultivated under steady-state and transient regimes. *Journal of Microbiological Methods*. 2000, vol. 40, issue 3, pp. 255–263. [https://doi.org/10.1016/S0167-7012\(00\)00130-5](https://doi.org/10.1016/S0167-7012(00)00130-5)
13. Feng Q., Xiao Y., Li X., Xue Zh., Fang F., Cao J., Oleyiblo J. O., Hu Zh. Using the dehydrogenase activity for alert of activated sludge system under different copper concentrations. *Desalination and Water Treatment*. 2016, vol. 57, issue 38, pp. 17836–17843. DOI: 10.1080/19443994.2015.1087339
14. Yan G., Cai B., Chen Ch., Wang Q., Guo Sh. Biodegradability evaluation of pollutants in acrylonitrile wastewaters based on particle size distribution. *Desalination and Water Treatment*. 2015, vol. 53, issue 10, pp. 2792–2798, DOI: 10.1080/19443994.2014.931530
15. Yuan J., Dong W., Sun F., Zhao K., Du Ch., Shao Y. Bacterial communities and enzymatic activities in the vegetation-activated sludge process (V-ASP) and related advantages by comparison with conventional constructed wetland. *Bioresource Technology*. 2016, vol. 220, pp. 341–348.
16. Qian G., Li L., Hu X., Yu X., Ye L. Enhancement of the biodegradability of activated sludge by the electric-coagulation multistage A/O membrane bioreactor treating low C/N industrial wastewater. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 2017, vol. 125, pp. 1–12. DOI: 10.1016/j.ibiod.2017.08.004
17. Passos V.F., Aquino Neto S., Andrade A.R., Reginatto V. Energy generation in a Microbial Fuel Cell using anaerobic sludge from a wastewater. *Scientia Agricola*. 2016, vol. 73, no. 5, pp. 424–428. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0194>
18. Stom D.I., Konovalova E.Yu., Zhdanova G.O., Tolstoy M.Yu., Vyatchina O.F. Active sludge and strains isolated from it as bioagents in biofuel cells. 17th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017 (27 June – 5 July, 2017). Bulgaria. 2017, vol. 17, issue 42, pp. 19–26. DOI: 10.5593/sgem2017/42/S17.003
19. Lashin A.F., Borokhoev N.D., Krasavtseva M.S., Stom D.I., Zhdanova G.O., Tolstoy M.Yu. *Bioelektrokhimicheskii element* [Bioelectrochemical element]. Utility model patent of RF, no. 170868, 2016.
20. Borokhoev N.D., Zhdanova G.O., Tolstoy V.M., Rzhchitskii A.E. *Bioelektrokhimicheskii element* [Bioelectrochemical element]. Utility model patent of RF, no. 168093, 2016.
21. Miksch K. Selection of the optimum methodology to determine the activity of activated sludge with the help of TTC tests. *Vom Wasser*. 1985, vol. 64, pp. 187–198. (In German)
22. Fairbridge R.A., Willis K.J., Booth R.G. The direct colorimetric estimation of reducing sugars and other reducing substances with tetrazolium salts. *The Biochemical Journal*. 1951, vol. 49, issue 4, pp. 423–427. DOI: 10.1042/bj0490423
23. Meseguer-Lloret S., Molins-Lagua C., Campins-Falco P. Ammonium Determination in Water Samples by Using Opa-Nac Reagent: A Comparative Study with Nessler and Ammonium Selective Electrode Methods. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. 2002, vol. 82, issue 7, pp. 475–489. DOI: 10.1080/0306731021000018107

Критерии авторства

Стом Д.И., Жданова Г.О., Саксонов М.Н., Барбора Л., Се Б., Горбунова Ю.О., Фиалков В.А., Купчинский А.Б. выполнили экспериментальную работу, на основании полученных результатов провели обобщение и написали рукопись. Стом Д.И., Жданова Г.О., Саксонов М.Н., Барбора Л., Се Б., Горбунова Ю.О., Фиалков В.А., Купчинский А.Б. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Стом Дэвард Иосифович,
д.б.н., профессор, заведующий лабораторией,
Иркутский государственный университет;
главный научный сотрудник,
Байкальский музей ИНЦ,
✉ e-mail: stomd@mail.ru

Жданова Галина Олеговна,
научный сотрудник,
Иркутский государственный университет,
e-mail: zhdanova86@ya.ru

Саксонов Михаил Наумович,
к.б.н., старший научный сотрудник,
Иркутский государственный университет,
e-mail: msaksonov@mail.ru

Барбора Лепакши,
д.н., технический специалист (I класс),
Индийский институт технологий Гувахати,
e-mail: lepakshib@gmail.com

Се Бэйчжэнь,
к.н., доцент,
Пекинский университет,
e-mail: xiebeizhen@buaa.edu.cn

Горбунова Юлия Олеговна,
инженер-исследователь,
Иркутский государственный университет;
аспирант,
Байкальский музей ИНЦ,
e-mail: iuliia_gorbunova_93@mail.ru

Фиалков Владимир Абрамович,
к.г.н., ведущий научный сотрудник,
Байкальский музей ИНЦ,
e-mail: fva@isc.irc.ru

Contribution

Devard I. Stom, Galina O. Zhdanova, Mikhail N. Saksonov, Lepakshi Barbora, Beizhen Xie, Julia O. Gorbunova, Vladimir A. Fialkov, Alexander B. Kupchinsky, Venko N. Beschkov carried out the experimental work, on the basis of the results summarized the material and wrote the manuscript. Devard I. Stom, Galina O. Zhdanova, Mikhail N. Saksonov, Lepakshi Barbora, Beizhen Xie, Julia O. Gorbunova, Vladimir A. Fialkov, Alexander B. Kupchinsky, Venko N. Beschkov have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

AUTHORS' INDEX

Devard I. Stom
Dr. Sci. (Biology), Professor, Head of the Laboratory,
Irkutsk State University;
Chief Researcher,
Baikal Museum ISC;
✉ e-mail: stomd@mail.ru

Galina O. Zhdanova,
Researcher,
Irkutsk State University,
e-mail: zhdanova86@ya.ru

Mikhail N. Saksonov,
Ph.D. (Biology), Senior Researcher,
Irkutsk State University,
e-mail: msaksonov@mail.ru

Lepakshi Barbora,
Ph.D., Technical Officer (Grade-I),
Indian Institute of Technology Guwahati,
e-mail: lepakshib@gmail.com

Beizhen Xie,
Ph.D., Associate Professor,
Beijing University,
e-mail: xiebeizhen@buaa.edu.cn

Julia O. Gorbunova
Research engineer,
Irkutsk State University;
Postgraduate Student,
Baikal Museum ISC;
e-mail: iuliia_gorbunova_93@mail.ru

Vladimir A. Fialkov,
Ph.D. (Geography), Leading Researcher,
Baikal Museum ISC,
e-mail: fva@isc.irc.ru

Купчинский Александр Борисович,
к.б.н., вр.и.о. директора,
Байкальский музей ИНЦ,
e-mail: albor67@mail.ru

Alexander B. Kupchinsky,
Ph.D. (Biology), Acting Director,
Baikal Museum ISC,
e-mail: albor67@mail.ru

Бешков Венко Николаев,
д.н., профессор,
Институт инженерной химии
Болгарской академии наук,
e-mail: vbeschkov@yahoo.com

Venko N. Beschkov,
Ph.D., Dr. Sci., Professor,
Institute of Chemical Engineering,
Bulgarian Academy of Sciences,
e-mail: vbeschkov@yahoo.com