



Эффекты анионактивного поверхностно-активного вещества додецилсульфата натрия на адгезию клеток штамма *Micrococcus luteus* 1-и на поверхности углеродных материалов

М.Н. Саксонов*, Г.О. Жданова*, Д.И. Стом*****, С.В. Алферов****,
А.Б. Купчинский**, Ю.Ю. Петрова*****, С.А. Сасим*, М.Ю. Толстой***,
А.Д. Стом*, А.Н. Чеснокова***, Б.В. Кукшинов*****

*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Российская Федерация

**Байкальский музей СО РАН, п. Листвянка, Российская Федерация

***Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Российская Федерация

****Тулский государственный университет, г. Тула, Российская Федерация

*****Сургутский государственный университет, г. Сургут, Российская Федерация

*****ФГБУ «Центр агрохимической службы «Иркутский», п. Дзержинск, Российская Федерация

Аннотация. Адгезия микроорганизмов на различных поверхностях играет важнейшую роль во многих биотехнологических процессах. Широко распространенным компонентом сточных вод является анионактивное поверхностно-активное вещество додецилсульфат натрия. Поверхностно-активные вещества оказывают большое влияние на все межфазные реакции, в том числе и в технологии микробных топливных элементов. Поэтому было изучено действие додецилсульфата натрия на сорбцию клеток штамма *Micrococcus luteus* 1-и, обладающего электрогенной активностью в микробных топливных элементах, на поверхности различных углеродсодержащих электродных материалов, применяемых в технологии биологических топливных элементов: 1) углеродная ткань; 2) углеродный войлок; 3) измельченные графитовые контактные троллейбусные вставки (летние); 4) березовый активированный уголь. С применением методов спектрофотометрии и микроскопии показано, что в условиях наших опытов присутствие додецилсульфата натрия в диапазоне концентраций 10–200 мг/л усиливало сорбцию клеток *Micrococcus luteus* 1-и на поверхностях испытуемых углеродных материалов. Максимальное увеличение сорбции за 2 ч экспозиции выявлено при внесении 100 мг/л этого поверхностно-активного вещества, оно составляло для березового активированного угля – 21%, для углеродной ткани – 26%, для углеродного войлока – 24% относительно контроля (без поверхностно-активного вещества). Продемонстрированная в работе достаточно эффективная адгезия клеток *Micrococcus luteus* 1-и на различных углеродных материалах, в том числе в присутствии довольно высоких концентраций додецилсульфата натрия, подтверждает перспективность данного штамма для применения в различных типах микробных топливных элементов.

Ключевые слова: адгезия микроорганизмов, *Micrococcus luteus*, углеродные материалы, додецилсульфат натрия

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ (РЦНИ) № 21-54-12022.

Для цитирования: Саксонов М.Н., Жданова Г.О., Стом Д.И., Алферов С.В., Купчинский А.Б., Петрова Ю.Ю., Сасим С.А., Толстой М.Ю., Стом А.Д., Чеснокова А.Н., Кукшинов Б.В. Эффекты анионактивного поверхностно-активного вещества додецилсульфата натрия на адгезию клеток штамма *Micrococcus luteus* 1-и на поверхности углеродных материалов // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 3. С. 370–381. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-3-370-381>. EDN: UMGJYE.

Effects of the anionactive surfactant sodium dodecyl sulfate on the adhesion of cells of the strain *Micrococcus luteus* 1-i to the surface of carbon materials

Michael N. Saksonov*, Galina O. Zhdanova*, Devard I. Stom*****, Sergey V. Alferov****, Aleksander B. Kupchinsky**, Yuliya Yu. Petrova*****, Sergey A. Sasim*, Michail Yu. Tolstoy***, Alina D. Stom*, Alexandra N. Chesnokova***, Bayar V. Kukshinov*****

*Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

**Baikal Museum of the SB RAS, Listvyanka, Russian Federation

***Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

****Tula State University, Tula, Russian Federation

*****Surgut State University, Surgut, Russian Federation

*****FSBI "Center of Agrochemical Service "Irkutsk", Dzerzhinsk, Russian Federation

Abstract. The adhesion of microorganisms on various surfaces plays a crucial role in many biotechnological processes. A widespread component of wastewater is the anion-active surfactant sodium dodecyl sulfate (SDS). Surfactants have a significant influence on all interfacial reactions, including those occurring in microbial fuel-cell technology. The work set out to study the effect of sodium dodecyl sulfate on the sorption of cells of the *Micrococcus luteus* 1 strain (which has electrogenic activity in microbial fuel cells) on the surface of various carbon-containing electrode materials used in biological fuel cell technology: 1) carbon tissue; 2) carbon felt; 3) crushed graphite contact trolleybus inserts (summer); 4) birch activated carbon. Using spectrophotometry and microscopy methods, the presence of sodium dodecyl sulfate in the concentration range of 10–200 mg/l was shown to increase the sorption of *Micrococcus luteus* 1-i cells on the surfaces of the tested carbon materials under experimental conditions. The maximum increase in sorption during 2 hours of exposure was detected when 100 mg/l of this surfactant was applied: for birch activated carbon – 21%; for carbon fabric – 26%; for carbon felt relative to the control (without surfactant) – 24%. The results demonstrate a sufficiently effective adhesion of *Micrococcus luteus* 1-i cells to various carbon materials, including in the presence of fairly high concentrations of sodium dodecyl sulfate, confirming the prospects of this strain for use in various types of microbial fuel cells.

Keywords: adhesion of microorganisms, *Micrococcus luteus*, carbon materials, sodium dodecyl sulfate

Funding. The reported study was funded by the RFBR grant 21-54-12022.

For citation: Saksonov M.N., Zhdanova G.O., Stom D.I., Alferov S.V., Kupchinsky A.B., Petrova Yu.Yu., Sasim S.A., Tolstoy M.Yu., Stom A.D., Chesnokova A.N., Kukshinov B.V. Effects of the anionactive surfactant sodium dodecyl sulfate on the adhesion of cells of the strain *Micrococcus luteus* 1-i to the surface of carbon materials. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2023;13(3):370–381. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2023-13-3-370-381>. EDN: UMGJYE.

ВВЕДЕНИЕ

Сорбция микроорганизмов играет важную роль в ряде биотехнологических областей. Адгезированные клетки микроорганизмов используют и в биотестировании [1–4], в том числе для детекции различных ионов в сточных водах применяют амперометрические биосенсоры на основе микробных топливных элементов (МТЭ) с иммобилизованными клетками и ферментами [5–9]. Сорбция нашла широкое применение и в процессах очистки загрязненных водных и почвенных сред в виде посаженных на носители-сорбенты микроорганизмов-биодеструкторов [10–15].

Большое значение процессы адгезии микроорганизмов играют и в технологии МТЭ – одной из перспективных в настоящее время областей альтернативной энергетики. МТЭ позволяют избавляться от загрязнителей и одновременно генерировать электрический ток [16–18]. В получении электрической энергии микроорганизмами в ходе окисления органических веществ важнейшим

фактором является способность передачи микроорганизмами электронов от субстрата к электроду [19]. Показано, что одним из наиболее распространенных и технологичных способов такой передачи является прямой перенос. В этом случае бактериальные клетки должны прямо прикрепляться к поверхности электрода и в таком состоянии осуществлять передачу электрона. Но на сегодняшний день очень важным и недостаточно изученным аспектом остаются исследования механизмов взаимодействия микроорганизмов с поверхностями, на которых они адсорбируются. Существует острая необходимость в выяснении зависимостей этих процессов от характера поверхности (материал электрода, его пористость, гидрофобность/гидрофильность, компонентный состав, заряд и т.д.), а также от воздействия на эти процессы различных факторов среды.

Значительное влияние на сорбцию микроорганизмов на твердых поверхностях может оказывать наличие в среде поверхностно-активных веществ (ПАВ) [20–22]. Они

адсорбируются на межфазных поверхностях и тем самым изменяют их характеристики. Кроме того, ПАВ являются одними из наиболее распространенных загрязнителей воды. Поэтому можно ожидать, что они могут существенно менять работу МТЭ при утилизации сточных вод [23].

Из ПАВ особенно часто в составе различных препаратов используется анионоактивный ПАВ додецилсульфат натрия (ДСН). В связи с вышесказанным целью данного исследования явилось изучение сорбции клеток электрогенного штамма *Micrococcus luteus* 1-и на различных электродных материалах, применяемых в МТЭ, под влиянием ДСН.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Бактерии. Объектом исследования являлся штамм *Micrococcus luteus* 1-и. Ранее он был выделен нами из активного ила очистных сооружений нефтеперерабатывающего предприятия. Штамм продемонстрировал довольно высокую электрогенную активность в МТЭ [24, 25]. Он депонирован во Всероссийскую коллекцию микроорганизмов (ВКМ) под номером ВКМ Ас-2637 D.

Поверхностно-активные вещества. Испытуемым ПАВ являлся представитель анионоактивных ПАВ натрия додецилсульфат (х.ч.; ЗАО «Вектон», Россия) – натриевая соль лаурилсерной кислоты (рис. 1).

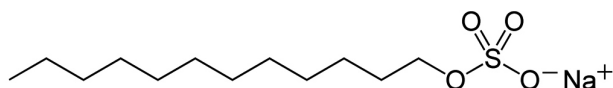


Рис. 1. Структурная формула додецилсульфата натрия

Fig. 1. Structural formula of sodium dodecyl sulfate

Это ПАВ широко используется в качестве высокоэффективного детергента в промышленности, в быту, в частности в процессах очистки от загрязнений. Растворы ПАВ (10, 100, 200, 400, 800 мг/л) для экспериментов готовили на физиологическом растворе (приготовленном на дистиллированной воде).

Углеродные материалы. Сорбцию клеток *M. luteus* 1-и изучали на различных материалах, применяемых в качестве электродов в МТЭ:

1) углеродная ткань «Урал Т22Р» (ОАО «СветлогорскХимволокно», Республика Беларусь) широко используется во многих типах МТЭ (почвенные МТЭ, безмембранные МТЭ бентосного типа, растительно-микробные ТЭ (рМТЭ), фотоМТЭ). Ее применяют как в качестве анодных, так и катодных электродов. Характеристики исследуемой в данной работе углеродной ткани (средний показатель по партии): толщина – 0,36 мм; удельная плотность волокна – 1,43 г/м²; удельное поверхностное электрическое сопротивление – 0,4 Ом; количество нитей – 25 мм (основы – 46, утка – 38); pH водной вытяжки – 8, массовая доля золы – 0,8%, влажность – 0,5%;

2) углеродный войлок «Карбопон-В-22» (ОАО «СветлогорскХимволокно», Республика Беларусь) также применим для всех типов МТЭ. Средний показатель по партии: удельная разрывная нагрузка – не менее 0,06 Н/мм²; удельное поверхностное электрическое сопротивление – не более 0,5 Ом; содержание углерода – не менее 99,5%;

3) измельченные угольные контактные троллейбусные вставки (летние) ВТЛ (АО «НИИЭИ», Россия)

перспективны в качестве анодного электрода (слоя) в рМТЭ, для применения в рМТЭ – троллейбусные угольные вставки (ТУВ), представляющие собой бруски длиной 8,5 см. Основные характеристики вставок (нормативный документ ТУ 303-90 ИЛЕА. 753353.018ТУ): удельное электрическое сопротивление – не более 300 Ом·мм²/м; модуль упругости – не менее 10000 кгс/мм²; твердость – не менее 25 Н/м. Вставки измельчали в шаровой мельнице до фракции размером 4–7 мм;

4) березовый активированный уголь «БАУ А» (ЗАО «Вектон», Россия) (ГОСТ 6217-74). Этот углеродный сорбент также применяется в рМТЭ в качестве анодного слоя (электрода).

Изучение сорбции клеток *M. luteus* 1-и на углеродных материалах спектрофотометрическим методом. Сорбцию клеток *M. luteus* 1-и на указанных материалах изучали по изменению оптической плотности бактериальных суспензий при экспозиции в них испытуемых электродных образцов. Для этого электродный материал обрабатывали микроорганизмами в двух разных вариантах.

Вариант 1. Навеску исследуемого материала (0,5; 1 или 2 г – в зависимости от сорбирующего материала) помещали в колбу (объемом 50 мл), заливали 20 мл испытуемого раствора ПАВ (в контроле – физиологического раствора без ПАВ). Затем туда добавляли микроорганизмы таким образом, чтобы начальная оптическая плотность бактериальной суспензии составляла 0,75. Смеси в колбах инкубировали на орбитальном шейкере BIOSAN OS-20 (Biosan, Латвия), скорость перемешивания составила 80 об/мин в течение 2 ч. После этого бактериальную суспензию отделяли от углеродных материалов фильтрацией через мельничный газ (размер ячейки – 0,064×0,064 мм). Затем определяли оптическую плотность суспензии (D_{ϕ}). Далее образцы исследуемых сорбирующих материалов отмывали 20 мл физиологического раствора с повторной фильтрацией через мельничный газ и измерением оптической плотности ($D_{от}$). Способ позволял оценить сорбцию бактериальных клеток при постоянном перемешивании.

Вариант 2. Навеску сорбента выдерживали в суспензии бактерий без перемешивания, используя для этого стеклянные колонки (диаметр – 14 мм, длина – 140 мм). Навеску углеродного материала (0,5; 1 или 2 г – в зависимости от сорбирующего материала) помещали в колонку. Ее заливали испытуемым раствором ПАВ объемом 20 мл. Как и в первом способе, время экспозиции составляло 2 ч. По истечении этого времени суспензию сливали и спектрофотометрировали (D_{ϕ}). Затем для отмыва неадсорбированных (оставшихся в толще суспензии) клеток микроорганизмов в колонки с сорбентом наливали 20 мл физиологического раствора. После этого измеряли оптическую плотность ($D_{от}$) суспензии клеток, отмываемых от сорбента.

В обоих вариантах определяли оптическую плотность полученного фильтрата на спектрофотометре ПЭ-5300В (ООО «Промышленные Экологические Лаборатории», Россия) при длине волны 540 нм и кювете 10 мм. Контролем служила суспензия бактериальных клеток, контактировавшая с сорбентом в отсутствии ДСН.

Полученные данные сопоставляли с оптической плотностью исходной бактериальной суспензии, взятой в опыт ($D_{исх}$), по следующей формуле:

$$A = \frac{D_{исх} - (D_{\phi} + D_{от})}{D_{исх}} \times 100\%, \quad (1)$$

где $D_{исх}$ – исходная оптическая плотность бактериальной суспензии ($D_{540} = 0,75$ ед.); D_{ϕ} – оптическая плотность бактериальной суспензии после фильтрации; $D_{от}$ – оптическая плотность бактериальной суспензии после отмыва углеродного материала; A – сорбция бактерий на углеродном материале.

Определение удельной массы клеток *M. luteus* 1-и. Массу сухих клеток в 1 мл суспензии устанавливали спектрофотометрическим методом. Для определения 5 пробирок типа Эппендорф взвешивали на аналитических весах. В пробирки вводили по 1 мл суспензии клеток *M. luteus* 1-и (с оптической плотностью 0,860) и центрифугировали при 11,8 тыс. об/мин на центрифуге Microspin12 (Biosan, Латвия). После центрифугирования клетки осаждали. Пробирки вместе с образовавшимся осадком помещали в термостат ТСО-80/1 (ОАО «Смоленское СКТБ СПУ», Россия) для высушивания клеток. Температура высушивания составила 30 °С. Далее вновь измеряли массу пробирок на аналитических весах Ohaus PR124 (Ohaus, США), определяя массу высушенного остатка. Измерения показали, что в 1 мл суспензии с оптической плотностью 0,860 опт. ед. содержалось 0,34 мг сухой бактериальной массы. Массу сухих клеток в 1 мл суспензии до адгезии рассчитывали по формуле (2), а массу сухих адсорбированных клеток – по формуле (3):

$$m = \frac{d_{исх} \times 0,34}{0,860} \text{ мг/л}, \quad (2)$$

$$x = \frac{d_{исх} - d_{\text{фильтр.}} - d_{\text{промыв.}}}{d_{исх.}} \times V \times m, \quad (3)$$

где x – масса адсорбированных клеток, мг; $d_{исх.}$ – оптическая плотность суспензии до адсорбции;

$d_{\text{фильтр.}}$ – оптическая плотность суспензии после фильтрации; $d_{\text{промыв.}}$ – оптическая плотность суспензии после отмыва от сорбента; m – концентрация сухих клеток до адсорбции, мг/л; V – объем суспензии, из которого адсорбировали клетки.

При этом прямая зависимость концентрации клеток от оптической плотности бактериальной суспензии наблюдалась в диапазоне 0,012–0,860 опт. ед.

Микроскопический анализ сорбции клеток *M. luteus* 1-и на углеродной ткани. С применением микроскопической техники оценивали влияние ДСН на прикрепление клеток к поверхности углеродных волокон. Для этого на основе физиологического раствора готовили растворы ДСН (10, 50, 100, 250, 500 мг/л). В 10 мл испытуемого раствора помещали нить углеродной ткани длиной 1 см и вносили 1-суточную культуру *M. luteus*. Контролем служила проба, приготовленная без добавления ПАВ (т.е. физиологический раствор). Полученные образцы экспонировали в течение 2 ч. По истечении этого времени нити углеродной ткани извлекали из растворов, промывали в физиологическом растворе и микроскопировали при увеличении $\times 50$ на поляризационном микроскопе Olympus BX53P (Olympus Corp., Япония).

Статистическая обработка данных. Все приводимые в работе цифровые значения сорбции получены не менее чем в 3-х независимых опытах, выполненных в 3-х повторностях. Статистическую обработку экспериментальных данных проводили в программах Statistica и Windows Excel. Выводы сделаны при вероятности безошибочного прогноза $P \geq 0,95$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные эксперименты выявили следующее. Анионоактивный ПАВ додецилсульфат натрия в определенных концентрациях повышал адгезию клеток *M. luteus* 1-и на всех испытуемых материалах. Наиболее активно сорбция *M. luteus* 1-и протекала на березовом активированном угле при концентрациях ДСН 100 мг/л при экспозиции в колбах и при 200 мг/л в колонках.

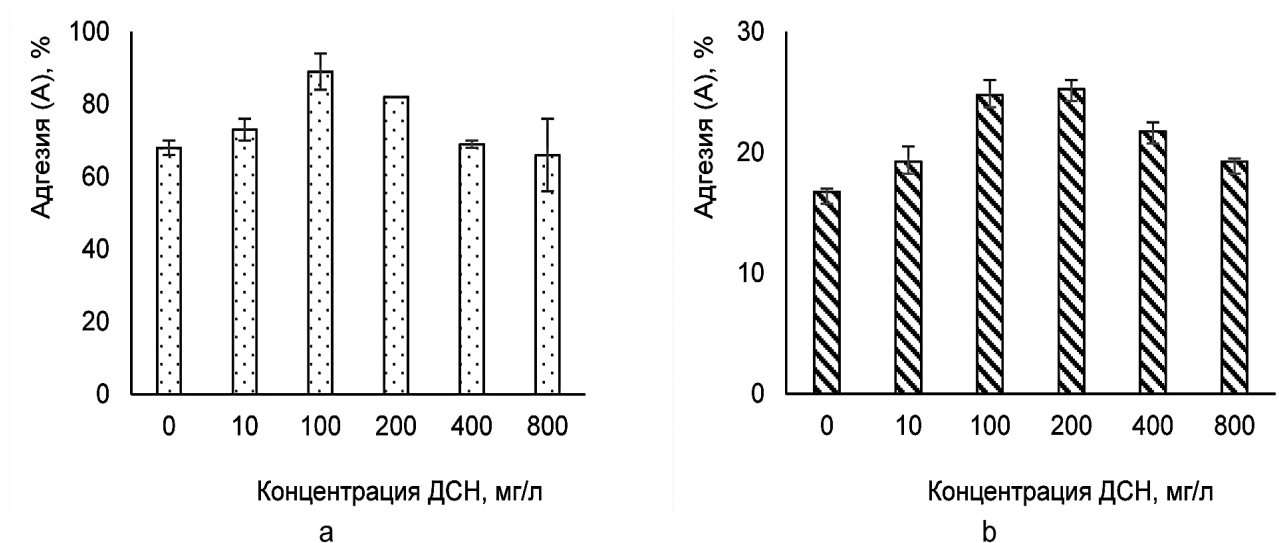


Рис. 2. Адгезия (%) клеток штамма *M. luteus* 1-и на березовом активированном угле в присутствии додецилсульфата натрия (навеска березового активированного угля 1 г, $t = 20$ °С); а – экспозиция в колбах на орбитальном шейкере (80 об/мин), б – экспозиция в колонках

Fig. 2. Adhesion (%) of *M. luteus* 1-i strain cells on birch activated carbon in the presence of sodium dodecyl sulfate (1 g of activated carbon sample, $t = 20$ °С); а – exposure in flasks on an orbital shaker (80 rpm), б – exposure in columns

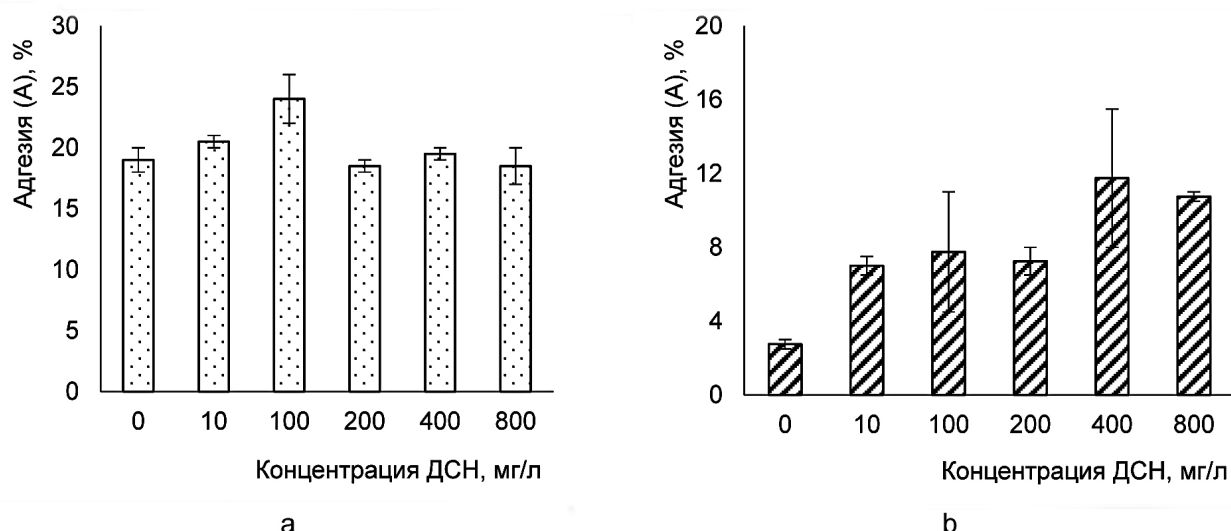


Рис. 3. Адгезия (%) клеток штамма *M. luteus* 1-и на взвесьях, полученных из дробленых троллейбусных угольных вставок, в присутствии додецилсульфата натрия (навеска троллейбусных угольных вставок 2 г, $t = 20^\circ\text{C}$); а – экспозиция в колбах на орбитальном шейкере (80 об/мин), б – экспозиция в колонках

Fig. 3. Adhesion (%) of *M. luteus* 1-i strain cells on suspensions obtained from crushed trolleybus coal inserts in the presence of sodium dodecyl sulfate (sorbent sample 2 g, $t = 20^\circ\text{C}$); а – exposure in flasks on an orbital shaker (80 rpm), б – exposure in columns

В первом случае она достигала $89 \pm 5\%$ (рис. 2, а), во втором – $25 \pm 1\%$ (рис. 2, б). Эти значения превышали в 1,5 и 1,3 раза контроль (т.е. без добавления ПАВ). При самой высокой из всех взятых в опыт концентраций испытуемого ПАВ, равной 800 мг/л, количество микробных клеток, сорбировавшихся на поверхности угля, не отличалось от контроля (рис. 2).

На взвесьях, полученных из дробленых ТУВ, адгезия клеток штамма *M. luteus* 1-и при экспозиции с перемешиванием (в колбе, на орбитальном шейкере) и без перемешивания (опыт в колонках) была различной. Так, максимум сорбции бактериальных клеток к этому сорбенту при экспозиции в колонках был достигнут при концентрации ДСН 400 мг/л ($12 \pm 4\%$; рис. 3, б), а в условиях перемешивания (экспозиция в колбах) – при 100 мг/л ($24 \pm 2\%$;

рис. 3, а). В то же время как адгезия в контроле (в отсутствии ПАВ) в указанных вариантах опыта составляла 2,8 (см. рис. 3, б) и 19% (см. рис. 3, а) соответственно. Как и в экспериментах с березовым активированным углем, негативного действия ДСН на сорбцию клеток *M. luteus* не было выявлено во всем исследуемом диапазоне его концентраций (от 10 до 800 мг/л) (рис. 3).

Как и в описанных выше экспериментах, количество клеток *M. luteus*, сорбировавшихся на углеродной ткани (рис. 4), повышалось при добавлении определенных концентраций ДСН. Так, при экспозиции углеродного сорбента в бактериальной суспензии в условиях постоянного перемешивания (в колбах на орбитальном шейкере) наибольшую сорбцию бактерий наблюдали в присутствии 10 и 100 мг/л ПАВ. Значение сорбции при этом

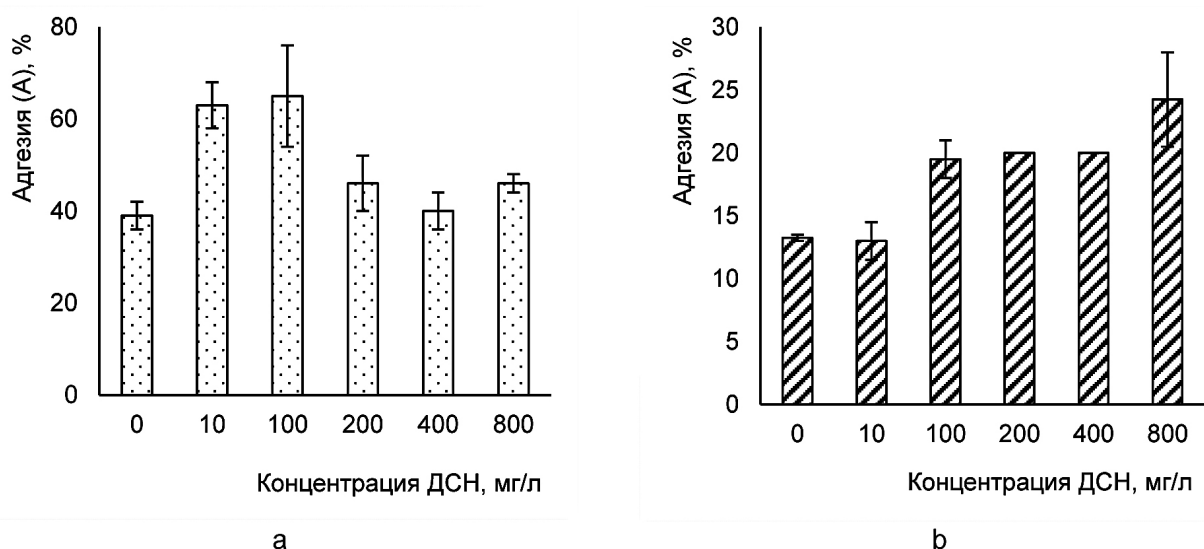


Рис. 4. Адгезия (%) клеток штамма *M. luteus* 1-и на углеродной ткани в присутствии додецилсульфата натрия (навеска ткани 1 г, $t = 20^\circ\text{C}$); а – экспозиция в колбах на орбитальном шейкере (80 об/мин), б – экспозиция в колонках

Fig. 4. Adhesion (%) of *M. luteus* 1-i strain cells on carbon tissue in the presence of sodium dodecyl sulfate (1 g sample of tissue, $t = 20^\circ\text{C}$); а – exposure in flasks on an orbital shaker (80 rpm), б – exposure in columns

составило 63 и 65±11% соответственно. Это в 1,6 раза превышало сорбцию штамма в контроле (39%), т.е. без добавления ПАВ. Внесение ДСН в концентрациях 200, 400 и 800 мг/л не вызывало изменения способности клеток *M. luteus* к адгезии на углеродной ткани. Об этом свидетельствовала равная степень сорбции бактери-

альных клеток в отсутствии (контроль) и присутствии указанных концентраций ПАВ (рис. 4, а).

При взаимодействии образцов углеродной ткани с бактериальной суспензией без перемешивания (экспозиция в колонках) максимальная степень сорбции клеток *M. luteus* была достигнута при добавлении

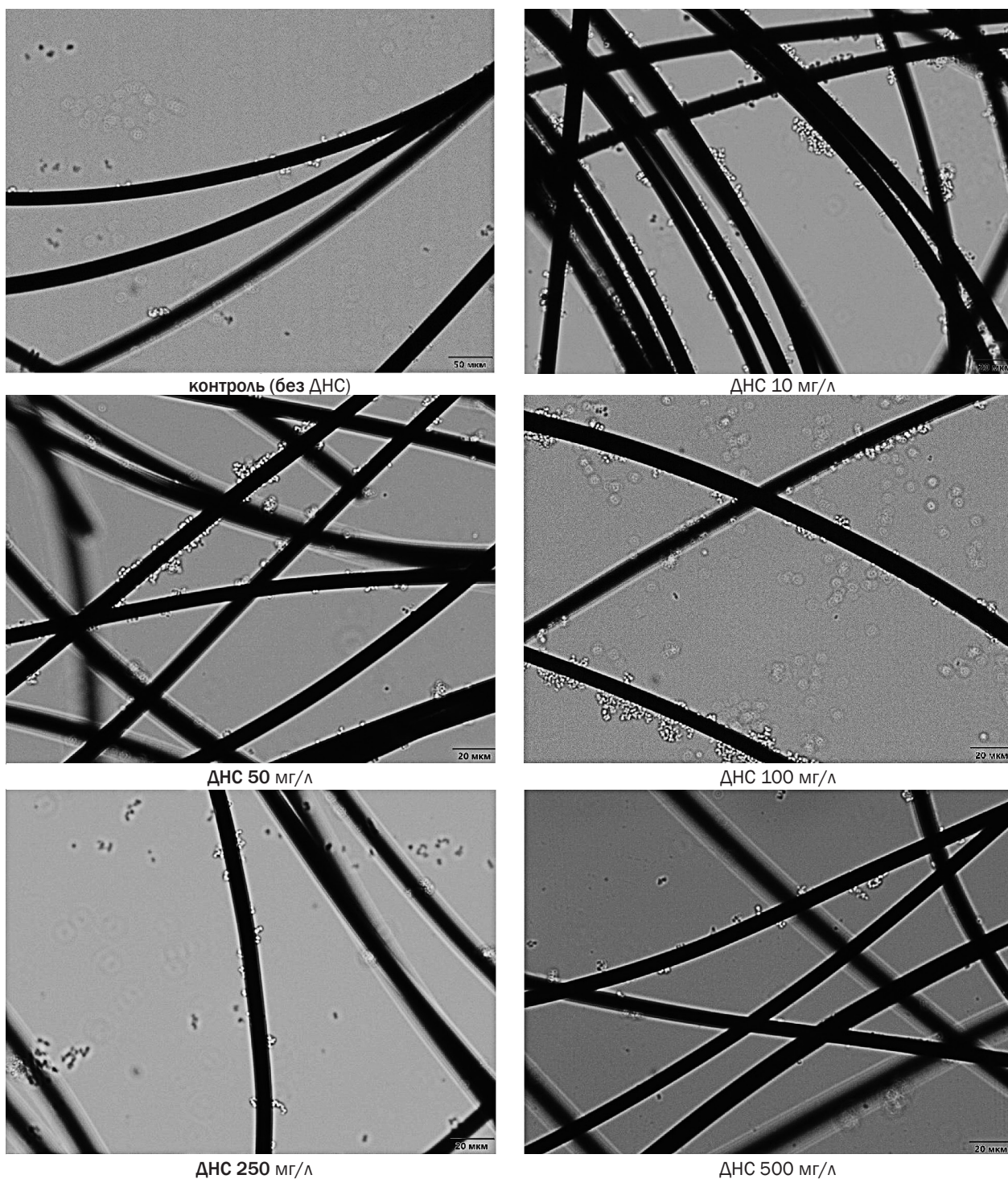


Рис. 5. Клетки штамма *M. luteus* 1-и, адгезированные на углеродных волокнах за 2 ч экспонирования в физиологическом растворе с добавлением додецилсульфата натрия 10, 50, 100, 250 и 500 мг/л (поляризационный микроскоп Olympus BX53P, увеличение в 500 раз)

Fig. 5. Cells of strain *M. luteus* 1-i, adhered to carbon fibers for 2 hours of exposure in saline with the addition of sodium dodecyl sulfate 10, 50, 100, 250 and 500 mg/l (polarizing microscope Olympus BX53P, magnification 500 times)

800 мг/л ДСН. В этом случае адгезия достигала $24 \pm 4\%$, в то время как в контроле (без ПАВ) – лишь 13%. В диапазоне концентраций ДСН от 100 до 400 мг/л количество сорбированных на ткани клеток (20%) также превышало контрольное значение. Добавление 10 мг/л испытуемого анионоактивного ПАВ не оказывало какого-либо действия на сорбцию клеток *M. luteus* на углеродной ткани (рис. 4, б).

Усиление сорбции клеток *M. luteus* на углеродной ткани под действием 10–100 мг/л ДСН подтверждено нами и микроскопическим методом. Микрофотографии, представленные на рис. 5, наглядно иллюстрируют значительно большее по сравнению с контролем количество клеток, прикрепленных к углеродным волокнам в присутствии указанных концентраций ДСН (см. рис. 5).

При использовании углеродного войлока в качестве сорбента было показано, что адгезия исследуемого штамма при экспозиции в колбах с перемешиванием достигала 98% при концентрации ДСН 100 мг/л. Это на 24% превышало сорбцию микробных клеток в отсутствие ПАВ. При содержании ПАВ 10, 200, 400 и 800 мг/л показатели сорбции колебались на уровне 77–86% и достоверно не отличались от контроля, т.е. без добавления ПАВ – 74% (рис. 6, а).

В опытах, в которых углеродный войлок выдерживали в бактериальной суспензии в колонках, сорбция клеток была значительно ниже (рис. 6, б), чем при экспозиции в колбах (на орбитальном шейкере) (см. рис. 6, а). При этом внесение 10 мг/л ДСН приводило к снижению сорбции *M. luteus* в 1,6 раза по сравнению с контролем. В присутствии 100, 200, 400 и 800 мг/л этого ПАВ выраженных эффектов ДСН на сорбцию клеток *M. luteus* зафиксировать не удалось (см. рис. 6, б).

Как и следовало ожидать, полученные результаты в целом указывают на более интенсивную сорбцию микроорганизмов при экспозиции сорбента в бактериальной суспензии при непрерывном перемешивании (в колбах на орбитальном шейкере), чем без переме-

шивания (экспозиция в колонках). На всех испытанных углеродных сорбентах в присутствии и отсутствии ДСН во всех концентрациях адгезия в колбах превышала таковую в колонках. Так, в опыте с БАУ она была выше в 4 раза, с ТУВ – в 7 раз, с углеродной тканью – в 3 раза, с углеродным войлоком – в 2,3 раза.

Для сопоставления сорбционной активности испытуемых углеродных материалов определяли удельную массу клеток (мг), сорбированных на 1 г сорбента. Результаты проведенных опытов показали следующее. По отношению к клеткам *M. luteus* 1-и максимальная сорбционная емкость БАУ и углеродной ткани была значительно выше (в 3–5 раз), чем емкость ТУВ (рис. 7). При этом наибольшее количество клеток сорбировалось на углеродной ткани. Удельная масса клеток *M. luteus*, сорбированных на этом носителе, составляла 3,24 мг/г, на активированном угле – 2,32 мг/г, на измельченных ТУВ – 0,65 мг/г (см. рис. 7).

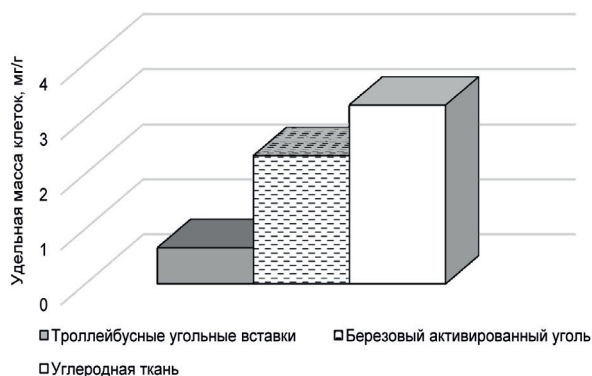


Рис. 7. Удельная масса (мг/г) клеток штамма *M. luteus*, сорбированных на испытуемых углеродных материалах (время экспозиции – 2 ч)

Fig. 7. Specific gravity (mg/g) of *M. luteus* cells adsorbed on the tested carbon materials (exposure time – 2 h)

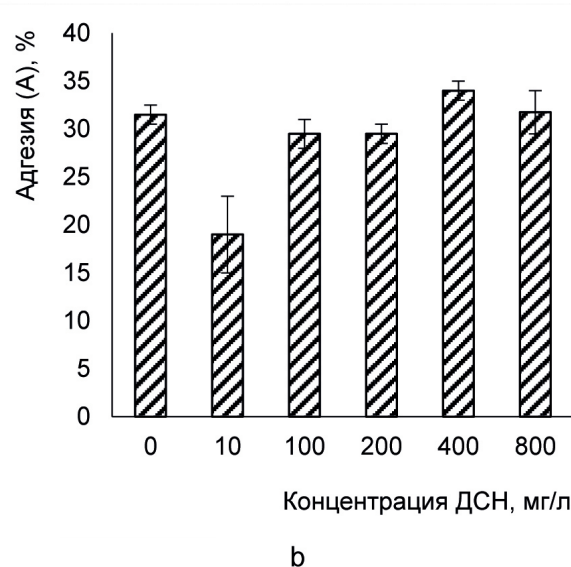
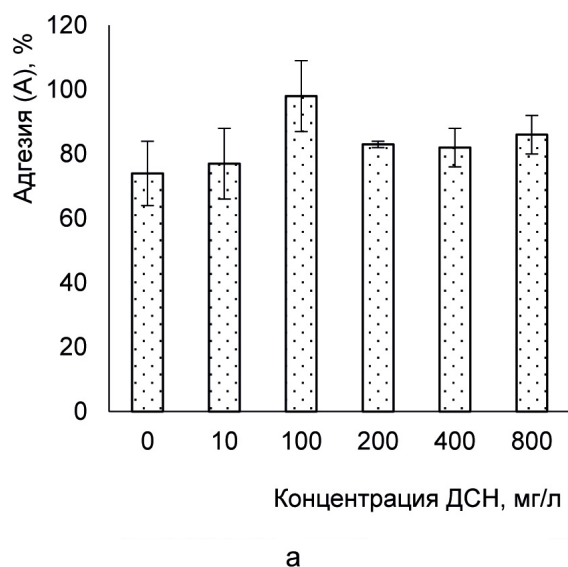


Рис. 6. Адгезия (%) клеток штамма *M. luteus* 1-и на углеродном войлоке в присутствии додецилсульфата натрия (навеска войлока 0,5 г, $t = 20^\circ\text{C}$); а – экспозиция в колбах на орбитальном шейкере (80 об/мин), б – экспозиция в колонках

Fig. 6. Adhesion (%) of *M. luteus* 1-i strain cells on carbon felt in the presence of sodium dodecyl sulfate (0.5 g of felt, $t = 20^\circ\text{C}$); а – exposure in flasks on an orbital shaker (80 rpm), б – exposure in columns

Таким образом, в условиях наших опытов углеродная ткань по удельной сорбции по отношению к клеткам штамма *M. luteus* 1-и не уступала активированному углю. Несколько иного характера материал получен ранее А. Ю. Максимовым с соавторами. В их опытах применение активированных углей в качестве носителей для иммобилизации штамма *R. ruber* gt. 1 более предпочтительно, чем использование волокнистых углеродных материалов [26].

Отмеченное выше положительное действие определенных концентраций ДСН на сорбцию бактерий *M. luteus* 1-и на БАУ, углеволокнистом войлоке и углеродной ткани согласуется с результатами других авторов. Например, схожие эффекты были описаны в работе [27] при исследованиях с бактериальным штаммом *Pseudomonas aeruginosa*. В этом случае под действием ДСН в концентрации, соответствующей критической концентрации мицеллообразования (8,3 мМ/л), величина адсорбции бактерий на поверхности углеродных сорбентов увеличивалась. Авторы предположили, что, возможно, это связано с тем, что поверхность углеродных сорбентов имеет отрицательный заряд, а ДСН является анионным ПАВ с положительным зарядом, что может увеличить адсорбционную способность бактерий на поверхности сорбентов [27]. К аналогичным выводам приходили и другие исследователи [28–30].

Авторами работы [31] показано, что легко био-разлагаемые анионные ПАВ децилсульфат натрия и додецилсульфат натрия в отдельных опытах вызывали увеличение числа прикрепленных бактерий и сопутствующее уменьшение числа взвешенных клеток микроорганизмов. По мере прогрессирования биодеградаций ПАВ эти тенденции менялись на противоположные, и бактериальные популяции в исследуемом микрокосме возвращались к своим исходным характеристикам.

Исходя из самой природы ПАВ, эти вещества способны модифицировать физико-химические свойства поверхностей. Данная их особенность должна (при определенных концентрациях) снижать сорбцию микроорганизмов к ним [32]. Большинство исследователей наблюдали негативное действие анионоактивного ПАВ додецилсульфата натрия на способность микробных клеток адсорбироваться на различных поверхностях. В частности, продемонстрировано ингибирование прикрепления клеток *Staphylococcus aureus* к поверхности стекла под действием ДСН [33].

Подобные эффекты наблюдали не только с анионоактивным ДСН, но и с другими ПАВ. Например, М. Содагари и др. [34] обнаружили, что анионный биосурфактант рамнолипид при содержании от 10 до 200 мг/л снижал гидрофобность клеточной поверхности грамотрицательных *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *P. putida* и грамположительных *Bacillus subtilis*. Он уменьшал и прикрепление этих 4-х бактерий как к гидрофильному, так и к гидрофобизированному стеклу.

М.Дж. Гросс, Б.Э. Логан показали, что ДСН (0,01%) вызывал значительное снижение гидрофобности клеточной поверхности и степени прикрепления клеток *Alcaligenes paradoxus* к поверхности стеклянных шариков [35]. Ю. Шен и соавторы продемонстри-

ровали, что ДСН значительно ингибирует образование биопленки грамположительных бактерий (*Staphylococcus aureus* и *Streptococcus mutans*) в концентрациях 0,31 мг/мл и выше [36]. Сорбция молекул ДСН вызывала изменения в гидрофобности поверхностей из стекла и полиэтилена и, следовательно, снижение адгезии клеток *S. aureus* [33].

Х. Чжун с соавторами [37] и Джи. Лю с коллегами [38] сообщали, что рамнолипид в низкой концентрации снижал степень удержания *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 на стеклянных шариках и кварцевом песке. Они отнесли это за счет понижения гидрофобности клеточной поверхности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По отношению к клеткам *M. luteus* 1-и максимальная удельная сорбция БАУ и углеродной ткани при перемешивании на орбитальном шейкере была значительно выше (в 2,5–4 раза), чем емкость измельченных ТУВ. При этом в условиях наших опытов углеродная ткань по величине удельной сорбции по отношению к клеткам штамма *M. luteus* 1-и не уступала активированному углю. Более интенсивная сорбция клеток микроорганизмов происходила при экспозиции сорбента в бактериальной суспензии при постоянном перемешивании (экспозиция в колбах на орбитальном шейкере при 80 об/мин), чем без перемешивания.

Присутствие анионоактивного ПАВ додецилсульфата натрия в диапазоне концентраций 10–200 мг/л усиливало сорбцию клеток *M. luteus* 1-и на поверхностях углеродного войлока, графита, активированного угля при экспозиции сорбента в бактериальной суспензии при постоянном перемешивании. Максимальное увеличение сорбции выявлено при внесении 100 мг/л этого ПАВ и составляло для березового активированного угля – 21%, углеродной ткани – 26%, углеродного войлока – 24% относительно контроля (без ПАВ). При экспозиции углеродных сорбентов без перемешивания (выдерживание в колонках) повышение числа адгезированных клеток происходило при еще более высоких концентрациях ДСН – до 800 мг/л. Это позволяет ожидать, что функционирование испытываемого штамма в МТЭ будет эффективным как в условиях проточного, так и периодического культивирования.

Испытанный в работе детергент очень часто встречается в составе сточных вод самых различных типов – как бытовых, так и промышленных. Это неизбежно приводит к его контакту с биологическими объектами в биотехнологических процессах очистки сточных вод. В том числе от присутствия ПАВ в значительной степени будут зависеть процессы генерирования электрического тока при очистке сточных вод в МТЭ, т.к. они в значительной степени определяются взаимодействием микробных клеток с поверхностями электродов. Показанная в экспериментах высокая степень адгезии клеток *Micrococcus luteus* 1-и на различных углеродных материалах, в том числе в присутствии довольно высоких концентраций ДСН, подтверждает перспективность данного штамма для применения в различных типах МТЭ.

REFERENCES

1. Lobakova E.S., Aleskerova L.E., Orlova A.A., Vasil'eva S.G., Ismailov A.D. Effect of polyethylenimine-based sorbents on the luminescence of photobacteria. *Microbiology*. 2017;86:155-157. <https://doi.org/10.1134/S002626171701009X>.
2. Hurtado-Gallego J., Pulido-Reyes G., González-Pleiter M., Fernández-Piñas F. Luminescent microbial bioassays and microalgal biosensors as tools for environmental toxicity evaluation. In: *Handbook of Cell Biosensors*. Springer, Cham; 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-23217-7_89.
3. Hussain F., Ashun E., Jung S.P., Kim T., Lee S.-H., Kim D.-J., et al. A direct contact bioassay using immobilized microalgal balls to evaluate the toxicity of contaminated field soils. *Journal of Environmental Management*. 2022;321:115930. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115930>.
4. Hamimed S., Mahjoubi Y., Abdeljelil N., Gamraoui A., Othmani A., Barhoum A., et al. *Chemical sensors and biosensors for soil analysis: principles, challenges, and emerging applications*. Elsevier; 2023, p. 669-698. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90222-9.00014-5>.
5. Habermüller K., Mosbach M., Schuhmann W. Electron-transfer mechanisms in amperometric biosensors. *Fresenius Journal of Analytical Chemistry*. 2000;366:560-568. <https://doi.org/10.1007/s002160051551>.
6. Goswami P. *Advanced materials and techniques for biosensors and bioanalytical applications*. Boca Raton, CRC Press, 2020. 314 p. <https://doi.org/10.1201/9781003083856>.
7. Mohan J.M., Amreen K., Javed A., Dubey S.K., Goel S. Emerging trends in miniaturized and microfluidic electrochemical sensing platforms. *Current Opinion in Electrochemistry*. 2022;33:100930. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100930>.
8. Andriukonis E., Celiesiute-Germaniene R., Ramanavicius S., Viter R., Ramanavicius A. From microorganism-based amperometric biosensors towards microbial fuel cells. *Sensors*. 2021;21(7):2442. <https://doi.org/10.3390/s21072442>.
9. Schachinger F., Chang H., Scheiblbrandner S., Ludwig R. Amperometric biosensors based on direct electron transfer enzymes. *Molecules*. 2021;26(15):4525. <https://doi.org/10.3390/molecules26154525>.
10. Alvarino T., Lema J., Omil F., Suárez S. Trends in organic micropollutants removal in secondary treatment of sewage. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*. 2018;17:447-469. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9472-3>.
11. Stom D.I., Konovalov A.S., Butyrin M.V., Tyutyunin V.V., Saksonov M.V., Penzina T.A. Change in toxicity of model arsenic contaminant in the presence of humates and activated zeolites. *Modern Applied Science*. 2015;9(1):223-230. <https://doi.org/10.5539/mas.v9n1p223>.
12. Kureel M.K., Geed S.R., Giri B.S., Rai B.N., Singh R.S. Biodegradation and kinetic study of benzene in bioreactor packed with PUF and alginate beads and immobilized with *Bacillus* sp. M3. *Bioresource Technology*. 2017;242:92-100. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.167>.
13. Scaffaro R., Lopresti F., Catania V., Santisi S., Cappello S., Botta L., et al. Polycaprolactone-based scaffold for oil-selective sorption and improvement of bacteria activity for bioremediation of polluted water: porous PCL system obtained by leaching melt mixed PCL/PEG/NaCl composites: oil uptake performance and bioremediation efficiency. *European Polymer Journal*. 2017;91:260-273. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2017.04.015>.
14. Chen Y., Yu B., Lin J., Naidu R., Chen Z. Simultaneous adsorption and biodegradation (SAB) of diesel oil using immobilized *Acinetobacter venetianus* on porous material. *Chemical Engineering Journal*. 2016;289:463-470. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.01.010>.
15. Lin J., Gan L., Chen Z., Naidu R. Biodegradation of tetradecane using *Acinetobacter venetianus* immobilized on bagasse. *Biochemical Engineering Journal*. 2015;100:76-82. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2015.04.014>.
16. Khandaker Sh., Das S., Hossain Md.T., Islam A., Miah M.R., Awual Md.R. Sustainable approach for wastewater treatment using microbial fuel cells and green energy generation – a comprehensive review. *Journal of Molecular Liquids*. 2021;344:117795. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2021.117795>.
17. Boas J.V., Oliveira V.B., Simões M., Pinto A.M.F.R. Review on microbial fuel cells applications, developments and costs. *Journal of Environmental Management*. 2022;307:114525. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114525>.
18. Ramya M., Kumar P.S. A review on recent advancements in bioenergy production using microbial fuel cells. *Chemosphere*. 2022;288:132512. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132512>.
19. Thapa B.S., Kim T., Pandit S., Song Y.E., Afsharian Y.P., Rahimnejad M., et al. Overview of electroactive microorganisms and electron transfer mechanisms in microbial electrochemistry. *Bioresource Technology*. 2022;347:126579. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126579>.
20. Nielsen C.K., Kjems J., Mygind T., Snabe T., Meyer R.L. Effects of Tween 80 on growth and biofilm formation in laboratory media. *Frontiers in Microbiology*. 2016;22(7):1878. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01878>.
21. Vaccari L., Allan D.B., Sharifi-Mood N., Singh A.R., Leheny R.L., Stebe K.J. Films of bacteria at interfaces: three stages of behavior. *Soft Matter*. 2015;11:6062-6074. <https://doi.org/10.1039/c5sm00696a>.
22. Qi L., Christopher G.F. Effects of non-ionic surfactant on the formation of pellicles by *Pseudomonas aeruginosa*. *Rheologica Acta*. 2022;61:59-68. <https://doi.org/10.1007/s00397-021-01313-0>.
23. Zhang Y., Jiang J., Zhao Q., Gao Y.Zh., Wang K., Ding J., et al. Accelerating anodic biofilms formation and electron transfer in microbial fuel cells: role of anionic biosurfactants and mechanism. *Bioelectrochemistry*. 2017;117:48-56. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2017.06.002>.
24. Konovalova E.Yu., Barbora L., Chizhik K.I., Stom D.I. *Micrococcus luteus* and *Serratia marcescens*, as a new association of bioagents for microbial fuel cells. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;408:012080. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/408/1/012080>.

25. Kuznetsov A.V., Khorina N.N., Kononova E.Yu., Amsheev D.Yu., Ponamareva O.N., Stom D.I. Bioelectrochemical processes of oxidation of dicarboxylic amino acids by strain *Micrococcus luteus* 1-I in a biofuel cell. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021;808:012038.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/808/1/012038>.
26. Maksimov A.Yu., Maksimova Yu.G., Kuznetsova M.V., Olontsev V.F., Demakov V.A. Immobilization of *Rhodococcus ruber* Strain gt1, possessing nitrile hydratase activity, on carbon support. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2007;43(2):193-198.
<https://doi.org/10.1134/S000368380702007X>. EDN: LKSIW.
27. Wu H., Liu X., Shi Ch., Yang J., Yang Z., Zhao Sh. Action modes of surfactants on biodegradation of Wudong low-rank coal by *Pseudomonas aeruginosa*. *Research Square*. 2022.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1410150/v1>.
28. Li Q., Logan B.E. Enhancing bacterial transport for bioaugmentation of aquifers using low ionic strength solutions and surfactants. *Water Research*. 1999;33(4):1090-1100.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00291-7](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00291-7).
29. Powelson D.K., Mills A.L. Water saturation and surfactant effects on bacterial transport in sand columns. *Soil Science*. 1998;163(9):694-704.
30. Streger S.H., Vainberg S., Dong H., Hatzinger P.B. Enhancing transport of *Hydrogenophaga flava* ENV735 for bioaugmentation of aquifers contaminated with methyl tert-butyl ether. *Applied and Environmental Microbiology*. 2002;68(11):5571-5579.
<https://doi.org/10.1128/AEM.68.11.5571-5579.2002>.
31. Marchesi J.R., Russell N.J., White G.F., House W.A. Effects of surfactant adsorption and biodegradability on the distribution of bacteria between sediments and water in a freshwater microcosm. *Applied and Environmental Microbiology*. 1991;57(9):2507-2513.
[https://doi.org/0099-2240/91/092507-07\\$02.00/0](https://doi.org/0099-2240/91/092507-07$02.00/0).
32. Janek T., Lukaszewicz M., Krasowska A. Antiadhesive activity of the biosurfactant pseudofactin II secreted by the Arctic bacterium *Pseudomonas fluorescens* BD5. *BMC Microbiology*. 2012;12:24.
<https://doi.org/10.1186/1471-2180-12-24>.
33. Koubali H., Latrache H., Zahir H., El Louali M. Kinetics of adhesion *Staphylococcus aureus* on glass in the presence of sodium lauryl sulfate. *Journal of Surfactants and Detergents*. 2021;24(3):483-490.
<https://doi.org/10.1002/jsde.12484>.
34. Sodagari M., Wang H., Newby B.Z., Ju L.K. Effect of rhamnolipids on initial attachment of bacteria on glass and octadecyltrichlorosilane-modified glass. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2013;103:121-128.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2012.10.004>.
35. Gross M.J., Logan B.E. Influence of different chemical treatments on transport of *Alcaligenes paradoxus* in porous media. *Applied and Environmental Microbiology*. 1995;61(5):1750-1756.
<https://doi.org/10.1128/aem.61.5.1750-1756.1995>.
36. Shen Y., Li P., Chen X., Zou Y., Li H., Yuan G., et al. Activity of sodium lauryl sulfate, rhamnolipids, and N-acetylcysteine against biofilms of five common pathogens. *Microbial Drug Resistance*. 2020;26(3):290-299.
<https://doi.org/10.1089/mdr.2018.0385>.
37. Zhong H., Liu G., Jiang Y., Brusseau M.L., Liu Z., Liu Y., et al. Effect of low concentration rhamnolipid on transport of *Pseudomonas aeruginosa* ATCC 9027 in an ideal porous medium with hydrophilic or hydrophobic surfaces. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2016;139:244-248.
<https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2015.11.024>.
38. Liu G., Zhong H., Jiang Y., Brusseau M.L., Huang J., Shi L., et al. Effect of low-concentration rhamnolipid biosurfactant on *Pseudomonas aeruginosa* transport in natural porous media. *Water Resources Research*. 2017;53(1):361-375.
<https://doi.org/10.1002/2016WR019832>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Саксонов Михаил Наумович,
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>

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

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

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>

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

Алферов Сергей Валерьевич,
к.х.н., заведующий лабораторией экологической и
медицинской биотехнологии, НИЦ «БиоХимТех»,
Тульский государственный университет,
300012, г. Тула, ул. Фридриха Энгельса, 157,
Российская Федерация,
s.v.alferov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5217-7815>

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

Петрова Юлия Юрьевна,
к.х.н., доцент, директор Института естественных и
технических наук,
Сургутский государственный университет,
628412, г. Сургут, ул. Энергетиков, 22,
Российская Федерация,
petrova_juju@surgu.ru, yyp.71@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3702-2249>

Сасим Сергей Александрович,
к.г.-м.н., доцент, заведующий кафедрой
полезных ископаемых, геохимии, минералогии и
петрографии,
Иркутский государственный университет,
664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1,
Российская Федерация,
sasimserg@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2712-0075>

Devard I. Stom,
Dr. Sci. (Biology), Professor,
Chief Researcher,
Baikal Museum SB RAS,
1, Academicheskaya St., Listvyanka, 664520,
Russian Federation;
Head of the Laboratory of Water Toxicology, Irkutsk
State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation;
Professor,
Irkutsk National Research Technical University, 83,
Lermontov St., Irkutsk, 664074,
Russian Federation,
✉stomd@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9496-2961>

Sergey V. Alferov,
Cand. Sci. (Biotechnology),
Head of the Laboratory,
Laboratory of Ecological and Medical Biotechnology,
RC "BioChemTech".
Tula State University,
157, Friedrich Engels St., Tula, 300012,
Russian Federation,
s.v.alferov@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-5217-7815>

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

Yulia Yu. Petrova,
Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor, Director
of the Institute of Natural and Technical Sciences,
Surgut State University,
22, Energetikov St., Surgut, 628412,
Russian Federation,
petrova_juju@surgu.ru, yyp.71@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3702-2249>

Sergey A. Sasim,
Cand. Sci. (Geology and Mineralogy),
Associate Professor, Head of the Department
of Mineral Resources, Geochemistry, Mineralogy
and Petrography,
Irkutsk State University,
1, K. Marx St., Irkutsk, 664003,
Russian Federation,
sasimserg@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2712-0075>

Толстой Михаил Юрьевич,
к.т.н., доцент, заведующий кафедрой инженерных коммуникаций и систем жизнеобеспечения, директор инновационного центра «Энергоэффективность», научный руководитель лаборатории качества воды, Иркутский национальный исследовательский технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Российская Федерация, tolstoi@istu.edu
<https://orcid.org/0000-0002-1573-060X>

Стом Алина Дэвардовна,
к.б.н., доцент, Иркутский государственный университет, 664003, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Российская Федерация, apatania@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7579-4971>

Чеснокова Александра Николаевна,
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>

Кукшинов Баяр Викторович,
руководитель аналитической лаборатории ФГБУ «Центр агрохимической службы «Иркутский», 664510, Иркутская область, р-н Иркутский, п. Дзержинск, ул. Садовая, 1, Российская Федерация, kukshinov1@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-7424-9695>

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Поступила в редакцию 02.04.2023.
Одобрена после рецензирования 10.06.2023.
Принята к публикации 31.08.2023.

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

Alina D. Stom,
Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Irkutsk State University, 1, K. Marx St., Irkutsk, 664003, Russian Federation, apatania@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-7579-4971>

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

Bayar V. Kukshinov,
Head of Analytical Laboratory Center for Agrochemical Service "Irkutsk" 1, Sadovaya St., Dzerzhinsk, 664510, Russian Federation, kukshinov1@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0006-7424-9695>

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

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

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

Information about the article

The article was submitted 02.04.2023.
Approved after reviewing 10.06.2023.
Accepted for publication 31.08.2023.