

Новые представления о механизме токообразующей реакции на биоанодах микробных топливных элементов

**Золотухина Екатерина Викторовна, Горьков К.В., Дмитриева М.В.,
Левченко М.Г., Силина Ю.Е.**

*Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии
РАН, г. Черноголовка, пр-т акад. Н.Н. Семенова, д. 1*

Биотопливные элементы, в частности, микробные топливные элементы (МТЭ), начиная с 60-х годов прошлого века являются интенсивно изучаемой тематикой. Идея использования естественных процессов переработки органических продуктов микроорганизмами, происходящих в природе и уже используемых человеком для переработки отходов многих производств, для получения электроэнергии является весьма привлекательной. Действительно, если из процесса питания микроорганизмов (бактерии, дрожжи, грибы), перерабатывающих отходы виноделен, пивоварен, сточных вод, извлекать электроэнергию, получаемый источник электроэнергии является наиболее экологичным из всех известных. В то же время, до сих пор коммерческих систем производства электроэнергии по технологии МТЭ так и не сделано, есть только пилотные установки. В первую очередь, это, конечно, связано со сложностью организации процесса передачи электронов от микроорганизма электроду и низкими мощностями МТЭ (мВт и мкВт с кв. см), пока не окупающими стоимость используемых для изготовления таких источников тока материалов. В то же время, сложность организации биоэлектродов связана с ограниченностью представлений о механизме процессов, ответственных за генерацию тока в таких системах.

Классические представления о работе биоэлектродов в МТЭ основаны на формировании пленки микроорганизмов на поверхности электродов и передачи электронов, формирующихся при ферментативных реакциях окисления органических субстратов в клетках, через внутренние или внешние редокс-активные молекулы (медиаторы) электроду-носителю. В рамках серии работ по амперометрическим сенсорам состояния микроорганизмов [1-7] нами было отмечено, что даже при непосредственном нанесении микроорганизма на электрод возможно определять состояние микроорганизмов по продуктам метаболизма, выделяемым в контактирующий с электродом раствор. Результаты этих работ послужили основой для идеи об альтернативном механизме, ответственном за возникновение тока в МТЭ, - прямом или медиаторном окислении электроактивных продуктов метаболизма микроорганизмов на электроде. Эта идея в [7, 8] была подтверждена экспериментами с культуральными средами, находящимися в контакте и отделенными от клеток микроорганизмов (*E.coli* и *S.cerevisiae* использовались как хорошо изученные классические культуры). Оказалось, что при метаболизме простых или сложных углеводов клетки *E.coli* выделяют жиры, адсорбция которых на электроде приводит к пассивации последнего, а клетки дрожжей вырабатывают во внешнюю среду

электроактивные метаболиты - органогидразины, различные соединения с гидрохинонными группами, что и определяет основной амперометрический отклик биоэлектрода [8]. Таким образом, впервые с начала развития МТЭ был предложен альтернативный механизм возникновения токового сигнала, что открывает возможность преодолеть порог развития МТЭ и реализовать идею получения электричества из природных процессов.

Исследования выполнены в рамках государственного задания ФИЦ ПХФ и МХ РАН (рег.№ ПТНИ 124013000692-4) в сотрудничестве с коллегами из Воронежского государственного университета (квантово-химические расчеты) и Саарского университета (хроматография, микроскопия, электроаналитика).

Литература:

- 1 Y.E. Silina, C. Fink-Straube, M. Koch, E.V. Zolotukhina A rapid in vitro electrochemical screening of extracellular matrix of *Saccharomyces cerevisiae* by palladium nanoparticles-modified electrodes. // *Bioelectrochemistry*, 2023. V. 149. P. 108283. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2022.108283>
- 2 M. Koch, A. Katsen-Globa, E.V. Zolotukhina, Y.E. Silina Testing of Yeast Cell damage using hydrogen peroxide spiking and Pd-NPs-based electrodes and impact of oxidoreductase presence on electrochemical read-out // *Biochemical engineering journal*. 2023 V. 195. P. 108908. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2023.108908>
- 3 E.V. Zolotukhina, E.V. Butyrskaya, M. Koch, P. Herbeck-Engel, M.G. Levchenko, Y.E. Silina First principles of hydrazine electrooxidation at oxides-free and oxides-based palladium electrodes in complex media // *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2023. V. 25. P. 9881–9893. DOI: 10.1039/D3CP00829K
- 4 Y.E. Silina, E.V. Zolotukhina, M. Koch, C. Fink-Straube A tandem of GCMS and electroanalysis for a rapid chemical profiling of bacterial extracellular matrix // *Electroanalysis*. P. e202300178. DOI: 10.1002/elan.202300178
- 5 E.V. Zolotukhina, E.V. Butyrskaya, C. Fink-Straube *et al.* Towards controlled and simple design of non-enzymatic amperometric sensor for glycerol determination in yeast fermentation medium // *AnalBioanalChem*. 2024. V. 416. P. 3619–3630. <https://doi.org/10.1007/s00216-024-05316-7>
- 6 Y.E. Silina, E.V. Butyrskaya, M. Koch, C. Fink-Straube, N. Korkmaz, M.G. Levchenko, E.V. Zolotukhina Mechanistic aspects of glycerol oxidation on palladium electrocatalysts in model aqueous and fermentation media solutions // *Electrochimica Acta*. 2024. V. 497. P. 144479. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.144479>
- 7 Y.E. Silina, M.O. Altmeuer, J. Lee, Y.J. Kim, E.V. Zolotukhina, M. Koch Novel approach for rapid electrochemical profiling of *Escherichia coli* cell-free supernatant // *Journal of Applied Electrochemistry*. 2025. V. 55 (2). P. 499-508. <https://doi.org/10.1007/s10800-024-02180-2>
- 8 E. Zolotukhina, K. Gor'kov, M. Dmitrieva, M. Levchenko, Y. Silina On the Nature of the Electrochemical Response in Mediated Bioanodes with Yeast Cells // *Bioelectrochemistry*. 2026. V. 169. P. 109197. <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2025.109197>