

ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ  
АГРОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА / ELECTROTECHNOLOGY, ELECTRICAL EQUIPMENT AND  
POWER SUPPLY OF THE AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.38.11>

ДИНАМИКА ФОРМИРОВАНИЯ РАЗНОСТИ ПОТЕНЦИАЛОВ В РАСТИТЕЛЬНОЙ  
БИОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОДАМИ

Научная статья

Кулешова Т.Э.<sup>1,\*</sup>, Гасиева З.А.<sup>2</sup>, Галушко А.С.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-3802-2494;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-0387-7997;

<sup>1,2,3</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (t.e.kuleshova[at]internet.ru)

**Аннотация**

Рассмотрены варианты биоэлектрохимических систем типа растительно-микробный топливный элемент с различным расположением электродных систем в корнеобитаемой среде для определения оптимального расстояния между катодом и анодом. Измерены динамики формирования разности потенциалов, морфометрические показатели растений и физико-химические показатели (электропроводность, pH) приэлектродных областей в растительных биоэлектрохимических системах на основе салата сорта Тайфун. Из исследованных вариантов расположения электродных систем наибольшее напряжение в БЭС до 400 мВ было получено при размещении верхнего электрода на расстоянии 30 мм от поверхности ячейки и нижнего электрода на расстоянии 30 мм от него.

**Ключевые слова:** растительно-микробный топливный элемент, корнеобитаемая среда, приэлектродная область, салат.

DYNAMICS OF POTENTIAL DIFFERENCE FORMATION IN PLANT BIOELECTROCHEMICAL SYSTEM,  
DEPENDING ON THE DISTANCE BETWEEN ELECTRODES

Research article

Kuleshova T.E.<sup>1,\*</sup>, Gasieva Z.A.<sup>2</sup>, Galushko A.S.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-3802-2494;

<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-0387-7997;

<sup>1,2,3</sup> Agrophysical Research Institute, Saint-Petersburg, Russian Federation

\* Corresponding author (t.e.kuleshova[at]internet.ru)

**Abstract**

The variants of bioelectrochemical systems of plant-microbial fuel element type with different arrangement of electrode systems in the root habitat to determine the optimal distance between the cathode and anode were examined. The dynamics of potential difference formation, morphometric parameters of plants and physico-chemical parameters (conductivity, pH) of the pre-electrode areas in plant bioelectrochemical systems based on lettuce of the Typhoon variety were measured. Of the studied variants of electrode system arrangement, the highest BEC voltage up to 400 mV was obtained when the upper electrode was placed at a distance of 30 mm from the cell surface and the lower electrode at a distance of 30 mm from it.

**Keywords:** plant-microbial fuel element, root habitat, pre-electrode area, salad.

**Введение**

Принцип работы растительных биоэлектрохимических систем (БЭС) или растительно-микробных топливных элементов (РМТЭ) – устройств для получения зеленой энергии при выращивании растительной продукции, основан на электрогенных процессах, протекающих в корнеобитаемой среде – окислительно-восстановительных реакциях и диффузии ионов, сопутствующих развитию корневой системы, и окислению ризодепозитов микроорганизмами с образованием углекислого газа, протонов и электронов [1], [2].

Эффективность БЭС зависит от совокупности ряда факторов, включающих как электроактивность растений [3] и микроорганизмов [4], так и влияние внешних параметров – температуры, влажности, состава и структуры корнеобитаемой среды, характеристик световой среды, связанной с интенсивностью фотосинтеза [5].

Одной из наиболее значимых причин низкой производительности БЭС является высокое сопротивление корнеобитаемой среды, выступающей аналогом электролита в электрохимических устройствах [6]. К возможным путям решения данной проблемы относят подбор электродных систем с высокой удельной поверхностью [7] и изменение расстояния между электродами [8]. В настоящее время в качестве материалов для электродов активно используются углеродные структуры – графитовые войлок, ткань, гранулы, стержень, бумагу, которые обладают развитой поверхностью благоприятной для развития микроорганизмов [9]. При этом оптимальное расположение электродов в БЭС с использованием различных растительных культур с учетом особенностей развития их корневой системы остается до сих пор не выявленным.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании генерации разности потенциалов в корнеобитаемой среде в ходе выращивания культурного растения в условиях различной конфигурации электродных систем в БЭС.

### Методы и принципы исследования

В качестве фитотест-объекта был выбран салат сорта Тайфун, имеющий развитую корневую систему стержневого типа с множеством боковых ответвлений. Растения выращивали в регулируемых условиях интенсивной светокультуры в вегетационно-облучательной установке с лампами ДНаТ-400 в качестве источников света [10]. Облученность составляла 70–75 Вт/м<sup>2</sup> в области фотосинтетически активной радиации, световой период 14 часов в сутки, температура воздуха +20–22°C днем и +18–20°C ночью, относительная влажность воздуха 65–70%. В качестве корнеобитаемой среды использовали универсальный торфяной грунт Агробалт-С (ООО «Пиндstrup», Россия). Влажность субстрата на уровне 60–70% от общей влагоемкости и количество микро- и макроэлементов, необходимых для получения качественной растительной продукции, поддерживали внесением раствора Кнопа [11].

Разработанная БЭС представляла собой емкость для выращивания растений площадью 70\*70 мм<sup>2</sup> и высотой 90 мм. Для определения расстояния, на котором наблюдается формирование максимальной разности потенциалов, электроды были размещены на разных уровнях по профилю корнеобитаемой среды (рис. 1):

- 1) вариант БЭС-4-2 – верхний электрод на глубине 40 мм от поверхности ячейки, нижний электрод на расстоянии 20 мм от него,
- 2) вариант БЭС-3-3 – 30 мм от поверхности до верхнего электрода и 30 мм между электродами,
- 3) вариант БЭС-2-4 – верхний электрод на расстоянии 20 мм от поверхности ячейки и нижний электрод в 40 мм от него,
- 4) вариант БЭС-3-1 – 30 мм от верха емкости до верхнего электрода и 10 мм между электродами,
- 5) вариант БЭС-3-2 – 30 мм от поверхности системы до верхнего электрода и нижний электрод на расстоянии 20 мм от него. Верхний электрод был выполнен из нержавеющей стали, а нижний из графитового войлока.

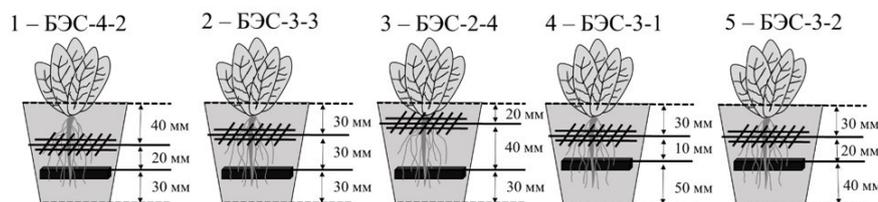


Рисунок 1 - Схематичное представление экспериментальных БЭС с различным расположением электродов в корнеобитаемой среде

DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.38.11.1>

*Примечание: 1 – БЭС-4-2 (40 мм от поверхности ячейки до верхнего электрода, 20 мм между электродами); 2 – БЭС-3-3 (30 мм от поверхности до верхнего электрода, 30 мм между электродами); 3 – БЭС-2-4 (20 мм от поверхности до верхнего электрода, 40 мм между электродами); 4 – БЭС-3-1 (30 мм от поверхности до верхнего электрода, 10 мм между электродами); 5 – БЭС-3-2 (30 мм от поверхности до верхнего электрода, 20 мм между электродами)*

Мониторинг изменения разности потенциалов в БЭС проводился с помощью аппаратной платформы Arduino [12], регистрация значений производилась каждые 15 минут в течение вегетационного периода.

Измерение pH и электропроводности в приэлектродных областях проводили с помощью pH метра ST20 (ОНАУС, Китай) и кондуктометра COM80 (НМ Digital, Россия) в водных вытяжках путем разведения 5 г корнеобитаемой среды, взятой с электродов, в 100 мл дистиллированной воды.

### Основные результаты

Для выявления оптимального расположения электродов в корнеобитаемой среде растений салата измерено изменение разности потенциалов в процессе вегетации при различных расположениях электродов в БЭС (рис. 2). Среднее значение разности потенциалов составило 220 мВ с разбросом в течении вегетационного периода 16 мВ для БЭС-4-2, 315 мВ с разбросом 64 мВ для БЭС-3-3, 253 мВ с разбросом 57 мВ для БЭС-2-4, 234 мВ с разбросом 35 мВ для БЭС-3-1, 229 мВ с разбросом 39 мВ для БЭС-3-2. Максимально наблюдаемое напряжение было 288 мВ для БЭС-4-2, 420 мВ для БЭС-3-3, 405 мВ для БЭС-2-4, 327 мВ для БЭС-3-1, 332 мВ для БЭС-3-2. Наибольшая генерация разности потенциалов была характерна для варианта БЭС-3-3.

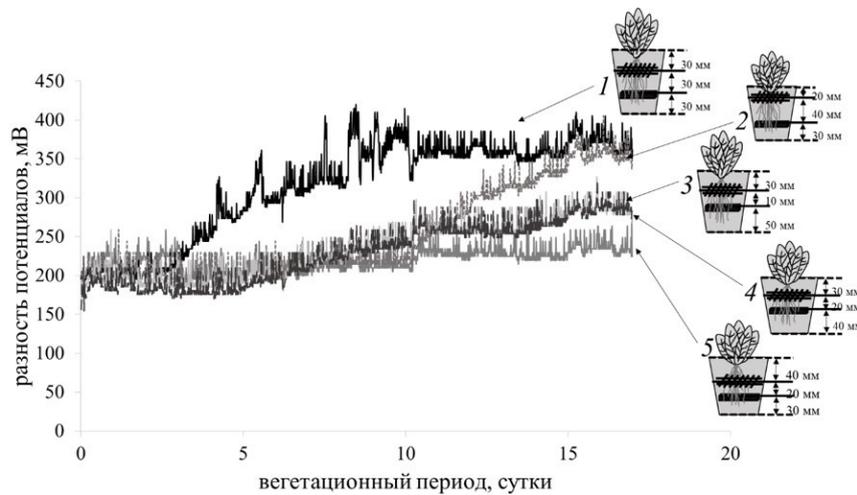


Рисунок 2 - Изменение разности потенциалов в корнеобитаемой среде салата в зависимости от расположения электродов в экспериментальной установке  
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.38.11.2>

Примечание: 1 – БЭС-3-3; 2 – БЭС-2-4; 3 – БЭС-3-1; 4 – БЭС-3-2; 5 – БЭС-4-2

Для определения концентрационного распределения ионов по профилю корнеобитаемой среды были измерены рН и электропроводность (табл. 1) приэлектродных областей на разной глубине корнеобитаемой среды.

Таблица 1 - Водородный показатель рН и электропроводность в областях верхнего и нижнего электродов при различных вариантах их расположения в БЭС  
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.38.11.3>

Вариант БЭС	рН в верхней приэлектродной области	рН в нижней приэлектродной области	Электропроводность в верхней приэлектродной области, мкСм/см	Электропроводность в нижней приэлектродной области, мкСм/см
БЭС-4-2	6,32±0,08	6,54±0,06	213±24	146±17
БЭС-3-3	6,25±0,07	6,68±0,05	240±32	137±9
БЭС-2-4	6,04±0,04	6,45±0,07	335±21	112±15
БЭС-3-1	6,35±0,08	6,55±0,04	268±18	135±20
БЭС-3-2	6,40±0,03	6,71±0,03	267±16	161±13

Морфометрические показатели салатов в исследованных БЭС были одинаковые – масса растений составила  $34.1 \pm 1.8$  г, высота  $17.4 \pm 1.0$  см, это говорит о том, что расположении электродов в корнеобитаемой среде не повлияло на развитие надземной части. На рисунке 3 представлен ход опыта – развитие салатов в БЭС, подключенных к регистрирующему устройству.



Рисунок 3 - Общий вид экспериментальных вариантов  
DOI: <https://doi.org/10.23649/JAE.2023.38.11.4>

Примечание: 1 – на 8-ой день; 2 – на 15-ый день; 3 – на 22-ой день эксперимента

### Обсуждение

Исследованы следующие варианты конфигурации БЭС с различным расположением электродов в корнеобитаемой среде – смещение верхнего электрода относительно поверхности ячейки на 40 мм (БЭС-4-2), 30 мм (БЭС-3-3) и 20 мм (БЭС-2-4) при одинаковом расположении нижнего электрода на расстоянии 30 мм от дна емкости, и изменение положения нижнего электрода на 50 мм (БЭС-3-1) и на 40 мм (БЭС-3-2) от дна ячейки при размещении верхнего электрода на расстоянии 30 мм от поверхности.

Для всех вариантов наблюдалось схожая динамика формирования разности потенциалов в корнеобитаемой среде салата. В первые 3 дня вегетации генерируемое напряжение составляло ~200 мВ и было стационарным. На 4-5 дни наблюдался плавный рост и стабилизация на 10-15 сутки.

Смещение верхнего электрода относительно поверхности емкости с 40 мм на 30 мм при фиксированном нижнем электроде привело к увеличению напряжения в БЭС более чем в 1.5 раза уже на 5-ый день вегетации, а сдвиг еще на 10 мм дальше привел к росту напряжения лишь с 10-ого дня эксперимента. Увеличение расстояния от поверхности ячейки до нижнего электрода (варианты БЭС-3-1 и БЭС-3-2) практически не повлияло на величину и динамику разности потенциалов.

Наличие разности потенциалов в корнеобитаемой среде может быть связано с неравномерным распределением питательных веществ и ионов по профилю и концентрационными эффектами. В целом, рН использованного торфяного субстрата был нейтральным. При этом водородный показатель верхнего электрода для всех вариантов был ниже, чем рН нижнего электрода, что говорит о подщелачивании нижних слоев почвы, вероятно, обусловленным вымыванием водой и накоплением таких элементов, как  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$ . В работе [13] было показано, что в БЭС на основе гидропонных систем при использовании графитового войлока в качестве материала для обоих электродов, наоборот, кислотность раствора, которым пропитан верхний электрод, составила  $6.6 \pm 0.1$ , а нижнего –  $6.1 \pm 0.2$ , что соответствовало наблюдаемой в системе полярности: верхний электрод электроотрицателен, то есть, вероятно, на нем накапливается больше ионов  $\text{OH}^-$ , а нижний электроположителен, так как содержит большее количество  $\text{H}^+$ . Видимо, для почвенной системы, в которой применяются электроды из различного материала, дополнительную роль играют различия в стандартном электродном потенциале, который отличается для металла и углеродного материала. В рассматриваемых БЭС в качестве верхнего электрода использовали нержавеющую сталь, а нижнего – графитовый войлок, при чем верхний электрод всегда был электроотрицателен по отношению к нижнему, из чего следует, что электродный потенциал углеродного материала выше, на нем происходят реакции восстановления, а на нержавеющей стали – окисления.

На основе измеренных показателей также видно, что чем ближе верхний электрод расположен к поверхности корнеобитаемой среды, тем выше рН – на расстоянии 20 мм он составляет 6.0, а на 40 мм – 6.3. Для нижнего электрода различия в водородном показателе на различном расположении от дна емкости менее значительны и лежат в диапазоне 6.5–6.7.

Электропроводность для всех вариантов выше в области верхнего электрода, что, возможно, связано с более интенсивными процессами в области корневой шейки растения. Наибольшая разница в показателях рН – 0.41 и электропроводности – 223 мкСм/см соответствовала варианту с наиболее разнесенным расстоянием между электродами в 40 мм.

### Заключение

На основе полученных данных о градиенте электрического потенциала, генерируемого в корнеобитаемой среде при выращивании растений салата в условиях защищенного грунта, были выбраны лучшие из исследованных условия расположения электродных систем – верхний электрод на расстоянии 30 мм от поверхности ячейки и нижний электрод на расстоянии 30 мм от него, которые позволили получать напряжение в БЭС на основе салата до 400 мВ.

Возможности использования растительных БЭС включают как фундаментальную значимость с точки зрения установления механизмов биоэлектрогенеза в корнеобитаемой среде, так и практическую ценность для областей биотехнологии и зеленой энергетики – от электроремедиации почв до ресурсосбережения и электропитания датчиков и портативных устройств, а также внедрение в умное сельское хозяйство и осуществление фитомониторинга.

### Финансирование

Грант Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук (МК-4397.2022.5).

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Funding

Grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists-Candidates of Science (МК-4397.2022.5).

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

**Список литературы / References**

1. Strik D. P. Green Electricity Production with Living Plants and Bacteria in a Fuel Cell / D. P. Strik, H. V. M. Hamelers, J. F. Snel, C. J. Buisman // *International Journal of Energy Research*. — 2008. — 32(9). — p. 870-876.
2. Kabutey F. T. An Overview of Plant Microbial Fuel Cells (PMFCs): Configurations and Applications / F. T. Kabutey, Q. Zhao, L. Wei, J. Ding, P. Antwi, F. K. Quashie, W. Wang // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2019. — 110. — p. 402-414.
3. Schampelaire L. D. Microbial Fuel Cells Generating Electricity from Rhizodeposits of Rice Plants / L. D. Schampelaire, L. V. D. Bossche, H. S. Dang, M. Höfte, N. Boon, K. Rabaey, W. Verstraete // *Environmental Science & Technology*. — 2008. — 42(8). — p. 3053-3058.
4. Logan B. E. *Microbial Fuel Cells* / B. E. Logan — New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. — 199 p.
5. Кулешова Т.Э. Биоэлектрохимические системы на основе электроактивности растений и микроорганизмов в корнеобитаемой среде (обзор) / Т.Э. Кулешова, А.С. Галушко, Г.Г. Панова, Е.Н. Волкова, W. Apollon, С. Шуан, С. Севда // *Сельскохозяйственная биология*. — 2022. — 57(3). — с. 425-440.
6. Timmers R. A. Characterization of the Internal Resistance of a Plant Microbial Fuel Cell / R. A. Timmers, D. P. Strik, H. V. Hamelers, C. J. Buisman // *Electrochimica Acta*. — 2012. — 72. — p. 165-171.
7. Maddalwar S. Plant Microbial Fuel Cell: Opportunities, Challenges, and Prospects / S. Maddalwar, K. K. Nayak, M. Kumar, L. Singh // *Bioresource Technology*. — 2021. — 341. — p. 125772.
8. Ahn Y. Altering Anode Thickness to Improve Power Production in Microbial Fuel Cells with Different Electrode Distances / Y. Ahn, B.E. Logan // *Energy and Fuels*. — 2013. — 27(1). — p. 271-276.
9. Zhou M. An Overview of Electrode Materials in Microbial Fuel Cells / M. Zhou, M. Chi, J. Luo, H. He, T. Jin // *Journal of Power Sources*. — 2011. — 196(10). — p. 4427-4435.
10. Панова Г. Г. Основы физического моделирования “идеальных” агроэкосистем / Г. Г. Панова, О. Р. Удалова, Е. В. Канаш, А. С. Галушко, А. А. Кочетов, Н. С. Прияткин, М.В. Архипов, И. Н. Черноусов // *Журнал технической физики*. — 2020. — 90(10). — с. 1633-1639.
11. Чесноков В.А. Выращивание растений без почвы / В.А. Чесноков, Е.Н. Базырина, Т.М. Бушуева — Ленинград: Издательство Ленинградского Университета, 1960. — 170 с.
12. Кулешова Т.Э. Неинвазивное измерение биоэлектрических потенциалов растений / Т.Э. Кулешова, А.В. Бушлякова, Н.Р. Галль // *Письма в Журнал технической физики*. — 2019. — 45(5). — с. 6-8.
13. Кулешова Т.Э. Концентрационный элемент на основе электрогенных процессов в корнеобитаемой среде / Т.Э. Кулешова, Г.Г. Панова, Н.Р. Галль, А.С. Галушко // *Письма в Журнал технической физики*. — 2022. — 48(8). — с. 29-32.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Strik D. P. Green Electricity Production with Living Plants and Bacteria in a Fuel Cell / D. P. Strik, H. V. M. Hamelers, J. F. Snel, C. J. Buisman // *International Journal of Energy Research*. — 2008. — 32(9). — p. 870-876.
2. Kabutey F. T. An Overview of Plant Microbial Fuel Cells (PMFCs): Configurations and Applications / F. T. Kabutey, Q. Zhao, L. Wei, J. Ding, P. Antwi, F. K. Quashie, W. Wang // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. — 2019. — 110. — p. 402-414.
3. Schampelaire L. D. Microbial Fuel Cells Generating Electricity from Rhizodeposits of Rice Plants / L. D. Schampelaire, L. V. D. Bossche, H. S. Dang, M. Höfte, N. Boon, K. Rabaey, W. Verstraete // *Environmental Science & Technology*. — 2008. — 42(8). — p. 3053-3058.
4. Logan B. E. *Microbial Fuel Cells* / B. E. Logan — New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. — 199 p.
5. Kuleshova T.E. Bioelektrohimicheskie sistemy na osnove elektroaktivnosti rastenij i mikroorganizmov v korneobitaemoj srede (obzor) [Bioelectrochemical Systems Based on the Electroactivity of Plants and Microorganisms in the Root Environment (review)] / T.E. Kuleshova, A.S. Galushko, G.G. Panova, E.N. Volkova, W. Apollon, S. Shuan, S. Sevda // *Agricultural Biology*. — 2022. — 57(3). — p. 425-440. [in Russian]
6. Timmers R. A. Characterization of the Internal Resistance of a Plant Microbial Fuel Cell / R. A. Timmers, D. P. Strik, H. V. Hamelers, C. J. Buisman // *Electrochimica Acta*. — 2012. — 72. — p. 165-171.
7. Maddalwar S. Plant Microbial Fuel Cell: Opportunities, Challenges, and Prospects / S. Maddalwar, K. K. Nayak, M. Kumar, L. Singh // *Bioresource Technology*. — 2021. — 341. — p. 125772.
8. Ahn Y. Altering Anode Thickness to Improve Power Production in Microbial Fuel Cells with Different Electrode Distances / Y. Ahn, B.E. Logan // *Energy and Fuels*. — 2013. — 27(1). — p. 271-276.
9. Zhou M. An Overview of Electrode Materials in Microbial Fuel Cells / M. Zhou, M. Chi, J. Luo, H. He, T. Jin // *Journal of Power Sources*. — 2011. — 196(10). — p. 4427-4435.
10. Panova G. G. Osnovy fizicheskogo modelirovaniya “ideal'nyh” agroekosistem [Fundamentals of Physical Modeling of “Ideal” Agroecosystems] / G. G. Panova, O. R. Udalova, E. V. Kanash, A. S. Galushko, A. A. Kochetov, N. S. Prijatkin, M. V. Arhipov, I. N. Chernousov // *Journal of Technical Physics*. — 2020. — 90(10). — p. 1633-1639. [in Russian]
11. Chesnokov V.A. Vyraschivanie rastenij bez pochvy [Growing Plants without Soil] / V.A. Chesnokov, E.N. Bazyrina, T.M. Bushueva — Leningrad: Publishing House of Leningrad University, 1960. — 170 p. [in Russian]
12. Kuleshova T.E. Neinvazivnoe izmerenie bioelektricheskikh potentsialov rastenij [Non-invasive Measurement of Plant Bioelectric Potentials] / T.E. Kuleshova, A.V. Bushljakova, N.R. Gall' // *Letters to the Journal of Technical Physics*. — 2019. — 45(5). — p. 6-8. [in Russian]
13. Kuleshova T.E. Kونسentratsionnyj element na osnove elektrogennyh protsessov v korneobitaemoj srede [Concentration Element Based on Electrogenic Processes in the Root Environment] / T.E. Kuleshova, G.G. Panova, N.R. Gall', A.S. Galushko // *Letters to the Journal of Technical Physics*. — 2022. — 48(8). — p. 29-32. [in Russian]