

## ПОИСК ПОТЕНЦИАЛОБРАЗУЮЩИХ ИОНОВ В ПИТАТЕЛЬНОМ РАСТВОРЕ БИОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Кулешова Т.Э., Желначева П.В., Гасиева З.А., Галушко А.С., Панова Г.Г.

Агрофизический научно-исследовательский институт

Гражданский пр-кт, 14, г. Санкт-Петербург, 195220, РФ; e-mail: kuleshova@agrophys.ru

Поступила в редакцию 20.07.2023. DOI: 10.29039/rusjbpс.2023.0618

**Аннотация.** В работе рассмотрено влияния состава питательного раствора на формирование разности потенциалов в корнеобитаемой среде и проведен поиск возможных потенциалообразующих ионов в биоэлектрохимических системах, основанных на электроактивных растительно-микробных взаимодействиях. Измерена разность потенциалов в корнеобитаемой среде при выращивании растений салата по технологии панопоники с использованием питательных растворов с увеличенным в два раза содержанием сульфата магния, хлорида калия и дигидроортофосфата калия. Проанализированы изменения электропроводности питательных растворов в процессе вегетационного периода и различия в водородных показателях и концентрациях ионов кальция, калия, аммония, нитрата в верхней и нижней приэлектродных областях биоэлектрохимических систем. Увеличение концентрации хлорида калия и дигидроортофосфата калия в питательном растворе привело к снижению и биомассы и среднего значения напряжения до 221 мВ и 188 мВ, соответственно, относительно характерной для контрольного варианта с классическим раствором Кнопа разности потенциалов составляющей 213 мВ. Удвоение концентрации сульфата магния, наоборот, вызвало повышение разности потенциалов до среднего значения 263 мВ и увеличения биомассы более чем на 30% относительно контроля. Вероятно, сульфат магния играет потенциалообразующую роль в формировании электрогенных реакций в системе корнеобитаемая среда-растения.

**Ключевые слова:** растительно-микробный топливный элемент, панопоника, углеродный войлок, салат.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отсутствие стабильности в обеспеченности ископаемым топливом (уголь, природный газ, нефть) и его неблагоприятном воздействии на окружающую среду привлекли всеобщее внимание к альтернативным возобновляемым источникам зеленой энергии. В частности, развитие получили устройства для получения электрической энергии за счет протекания химических реакций, сопутствующих жизнедеятельности живых организмов – биоэлектрохимические системы (БЭС). Устойчивое производство биоэлектричества в процессе метаболических реакций растений и микроорганизмов с помощью растительно-микробных топливных элементов (РМТЭ) поможет удовлетворить растущий спрос на экологически чистые энергетические ресурсы.

В корнеобитаемой среде растений наблюдается наличие электрических полей, при этом перемещение зарядов может быть обусловлено электроактивностью растений и микроорганизмов [1]. Микроорганизмы, способные напрямую передавать электроны на химическое вещество или материал, называются экзоэлектрогенами [2]. Электроактивные бактерии действуют как биокатализатор, который стимулирует разложение органических веществ с передачей электронов на анод, затем электроны транспортируются по внешней цепи к катоду [3], где ионы водорода, перемещающиеся в БЭС по градиенту концентраций, реагируют с кислородом с образованием воды [4]. Выделяемые корнями экссудаты выступают в роли углеродного субстрата для размножения благотворно влияющих на состояние корнеобитаемой среды популяций ризобактерий [5], стимулируют хемотаксис [6] и некоторые из них (например, муравьиная кислота, янтарная кислота и биотин) могут действовать как медиаторы межэлектронного переноса [7]. Наряду с этим ризосферные бактерии облегчают поглощение растениями питательных веществ, переводя их в более легко усвояемую форму [8]. Отмечено, что БЭС положительно влияет на развитие растений – в РМТЭ бобы мунг (*Vigna radiata*) росли почти в 2 раза быстрее, чем растения в контрольном варианте [9].

Теоретически рассчитанная удельная мощность РМТЭ, использующих в качестве энергоресурса способность бактерий окислять ризодепозиты, составляет 3,2 Вт/м<sup>2</sup> [10]. На данный момент одним из максимально достигнутых показателей в экспериментальных исследованиях является РМТЭ с использованием лилий (*Wachendorfia thyrsiflora* Burm.), позволивший получить 1,036 Вт/м<sup>3</sup> при функционировании в течении 54 дней [11].

Основное применение БЭС направлено на получение электричества в удаленных от основных энергосетей районах и совмещение с производством растительной продукции, что может быть реализовано как в естественных условиях, так и в искусственно создаваемых агроэкосистемах, фабриках защищенного грунта, зеленых крышах [12]. Также перспективным является использование РМТЭ для биоремедиации почв, создания биосенсоров, корректировки условий выращивания. БЭС активно внедряются в установки для очистки сточных вод [13] и удаления тяжелых металлов [14]. Кроме того, применение БЭС в производстве поможет снизить выбросы парниковых газов и улучшить состояние окружающей среды [15]

Одной из наиболее значимых причин низкой производительности БЭС является высокое сопротивление корнеобитаемой среды, выступающей аналогом электролита в электрохимических устройствах. К возможным путям решения данной проблемы относят: 1) подбор электродных систем с высокой удельной поверхностью (в качестве таких применяют углеродные материалы – графитовые войлок, ткань, гранулы, стержень, бумагу [16]); 2) изменение расстояния между электродами [17]; 3) внесение химического посредника – редокс-медиатора, повышающего эффективность транспорта электронов [18]; 4) уменьшение внутреннего сопротивления и увеличение проводимости [19]. Предположительно, в основе электрогенных процессов в корнеобитаемой среде могут лежать возникающие в результате транспорта ионов концентрационные эффекты. Ранее было показано, что использование в биоэлектрохимической системе питательного раствора, содержащего азот в нитратной форме ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \times 4\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{KNO}_3$ ), позволило получать лучшие показатели по величине и стабильности генерируемого напряжения по сравнению с использованием растворов, включающих смешанную нитратно-аммонийную ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ) и амидную ( $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ) формы азота [20]. В связи с этим актуальным является идентификация ионов, обеспечивающих увеличение ионной проводимости и снижение сопротивления корнеобитаемой среды.

Целью данной работы было изучение влияния состава питательного раствора на формировании разности потенциалов в корнеобитаемой среде и поиск потенциалобразующих ионов.

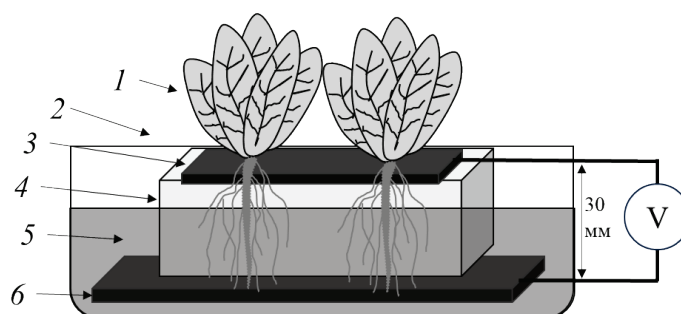
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Растения выращивали по технологии тонкослойной панопоники [21] в условиях интенсивной светокультуры на биополигоне ФГБНУ АФИ в вегетационной установке с лампами ДНаТ-400 в качестве источников света. Облученность составляла  $75 \pm 5$  Вт/м<sup>2</sup> в области фотосинтетически активной радиации (ФАР), световой период – 14 часов в сутки, температура воздуха  $+20$ - $22^\circ\text{C}$  днем и  $+18$ - $20^\circ\text{C}$  – ночью, относительная влажность воздуха – 65-70%. В качестве фитотест-объекта был выбран листовой салат (*Lactuca sativa* L.) сорта Тайфун производства ООО «Сортсеменовощ» (Россия), имеющий развитую корневую систему стержневого типа с множеством боковых ответвлений.

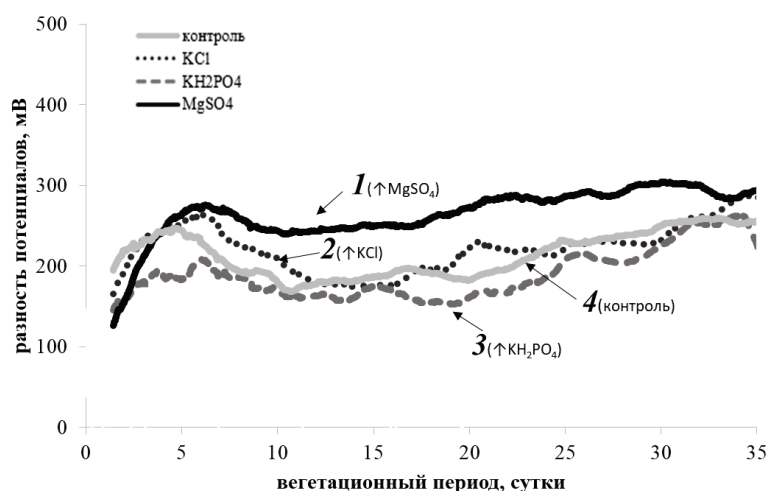
Для изучения электрических явлений, возникающих в корнеобитаемой среде, лучшим объектом являются искусственные среды на основе питательных растворов за счет меньшего количества влияющих внешних факторов (в первую очередь влажность) и большей управляемости параметрами (составом) среды обитания. Экспериментальная БЭС представляла собой ячейку площадью  $187 \times 137$  мм<sup>2</sup> и высотой 36 мм, в которой размещали и выращивали пророщенные семена салата в количестве 2 растений (рис. 1). Измеряемой характеристикой, отражающей биоэлектрическую активность корневой системы и сопутствующих микроорганизмов и протекание метаболических процессов в корнеобитаемой среде, служил биоэлектрический потенциал (БЭП) – разность потенциалов, измеряемая в нашем случае между корневой шейкой и дном емкости для выращивания. Для регистрации БЭП, формируемых в корнеобитаемой среде, в системы для культивирования устанавливали коррозионностойкие биосовместимые электроды из графитового войлока толщиной 5 мм с большой удельной поверхностью, обеспечивающие поверхностный электрический контакт с корневой системой [22]. Мониторинг изменения разности потенциалов осуществляли с помощью аппаратной платформы Arduino каждые 15 минут в течение всего вегетационного периода. Также в процессе эксперимента проводили измерение показателей электропроводности питательных растворов с помощью кондуктометра COM-80 (HM Digital, США).

В работе были исследованы следующие варианты питательного раствора Кнопа [23]:

- 1) БЭС1 – с увеличенным в два раза содержанием хлорида калия  $\text{KCl}$ , улучшающим развитие корневой системы за счет влияния на оводненность растений, повышения осмотического давления в клетках и их водоудерживающей способности;
- 2) БЭС2 – с увеличенным в два раза содержанием дигидроортофосфата калия  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , улучшающим продуктивность растений за счет реализации потребностей в фосфоре и калии;
- 3) БЭС3 – с увеличенным в два раза сульфата магния  $\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ , приводящим к повышению урожайности за счет участия магния в фотосинтезе;
- 4) БЭС-К – контрольный вариант с классическим раствором Кнопа.



**Рисунок 1.** Схематичное изображение экспериментальной биоэлектрохимической системы, включающей: 1 – растительный объект, 2 – емкость для выращивания, 3 – верхний электрод, 4 – платформу для растений, покрытую влагопроводящим элементом, 5 – питательный раствор, 6 – нижний электрод, V – вольтметр



**Рисунок 2.** Разность потенциалов в корнеобитаемой среде при выращивании растений салата в БЭС с питательным раствором с увеличенным в два раза содержанием: 1 – сульфата магния (БЭС3), 2 – хлорида калия (БЭС1), 3 – дигидроортофосфата калия (БЭС2) и 4 – контрольный вариант с классическим раствором Кнопа (БЭС-К)

В каждый вариант были дополнительно добавлены микроэлементы по Чеснокову с соавторами [13].

Вегетационный опыт проводили дважды, с 3х-кратной повторностью исследуемых вариантов в каждом эксперименте. Уборку осуществляли на 35-ые сутки от посева семян. При уборке учитывали сырую массу надземной части и корней, высоту растений. Концентрацию ионов на электродах в конце эксперимента определяли готовя водную вытяжку и применяя соответствующие ионоселективные электроды, подключенные к анализатору Экотест-120 (Эконикс, Россия).

Статистическую обработку данных проводили с применением программ Excel 2010. Определяли средние значения изучаемых показателей, доверительные интервалы. Достоверность различий между вариантами оценивали методами параметрической (t-критерий Стьюдента) статистики. Различия между вариантами считали достоверными при  $p \leq 0,05$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

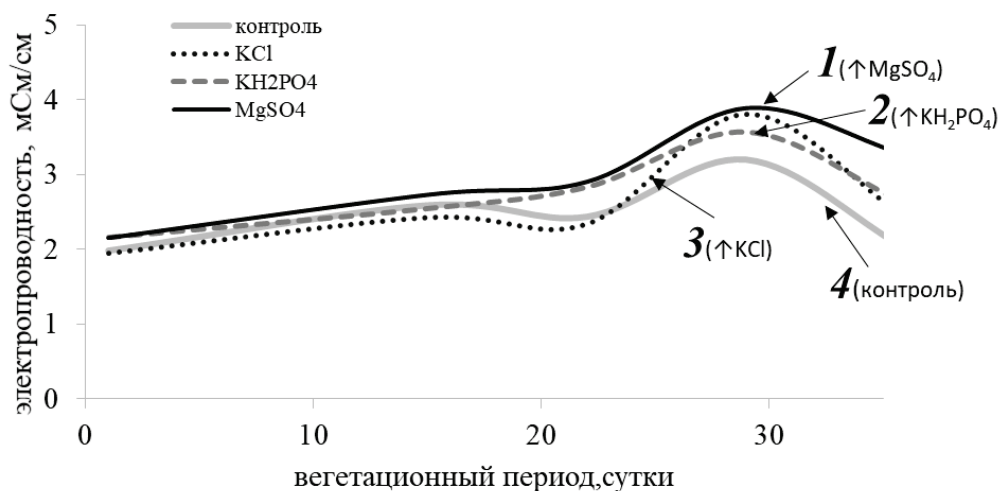
Динамика формирования разности потенциалов в корнеобитаемой среде в процессе развития растений салата представлена на рис. 2. Общая тенденция изменения БЭП в течение вегетационного периода при выращивании с использованием питательного раствора различного состава схожая – наблюдается рост напряжения в первые 5-ть дней, затем небольшой спад и на 10-ый день выравнивание, после чего с 15-ого дня значения снова возрастают и стабилизируются на уровне начальных и выше. Интересно отметить, что начиная с 5-ых суток эти изменения не превышают 15 % для варианта БЭС3, тогда как для контрольного варианта БЭС-К они составляют около 30 %, а для БЭС1 и БЭС2 достигают 40 %. Вероятно, добавление в питательный раствор сульфата магния поспособствовало более стабильной генерации БЭП в системе.

Сводные данные по полученным морфометрическим характеристикам салата и электрическим показателям БЭС представлены в таблице 1. Использование классического питательного раствора Кнопа приводило к формированию разности потенциалов в системе корнеобитаемая среда-растения на среднем уровне 213 мВ, с максимальным напряжением составляющим 260 мВ. Увеличение концентрации хлорида калия и дигидроортофосфата калия в питательном растворе снизило среднее значение напряжения до 221 мВ в БЭС1 и 188 мВ в БЭС2. Тогда как в удвоение концентрации сульфата магния, наоборот, вызвало повышение разности потенциалов до среднего значения 263 мВ и максимального 306 мВ в БЭС3, что превышало контрольные

**Таблица 1.** Морфометрические и электрические показатели исследованных БЭС

Вариант БЭС	Масса листьев, г	Высота растений, см	Масса корней, г	Среднее напряжение, мВ	Максимальное напряжение, мВ
БЭС1 (↑KCl)	15,7±2,1*	12,5±1,1	4,3±0,5*	221±19	289
БЭС2 (↑KН <sub>2</sub> РО <sub>4</sub> )	14,6±2,8*	13,4±2,2	6,4±0,8*	188±19*	264
БЭС3 (↑MgSO <sub>4</sub> )	35,3±2,7*	15,1±2,7	10,7±0,9*	263±22*	306*
БЭС-К	21,1±2,3	13,2±3,0	8,2±0,9	213±14	260

\* - значение достоверно отличается от контрольного на 5% уровне значимости



**Рисунок 3.** Электропроводность питательных растворов при выращивании растений салата в БЭС с увеличенным в два раза содержанием: 1 – сульфата магния (БЭС3), 2 – дигидроортофосфата калия (БЭС2), 3 – хлорида калия (БЭС1) и 4 – контрольный вариант с классическим раствором Кнопа (БЭС-К)

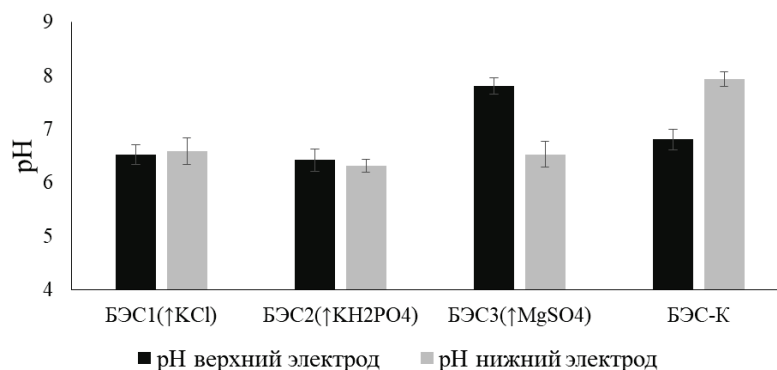
значения почти на 25%. Морфометрические показатели для вариантов БЭС1 и БЭС2 были также ниже контрольных, при этом в БЭС3 удалось достичь увеличения биомассы более чем на 30%.

На протяжении эксперимента проводилось измерение электропроводности питательных растворов в исследуемых БЭС (рис. 3). Изменение способности корнеобитаемой среды проводить ток коррелировало с динамикой формирования разности потенциалов – увеличение содержания ионов за счет концентрирования раствора в течение вегетационного периода приводило к росту напряжения в БЭС к концу опыта. Большие показатели электропроводности были характерны для корнеобитаемой среды БЭС3 с повышенной концентрацией сульфата магния.

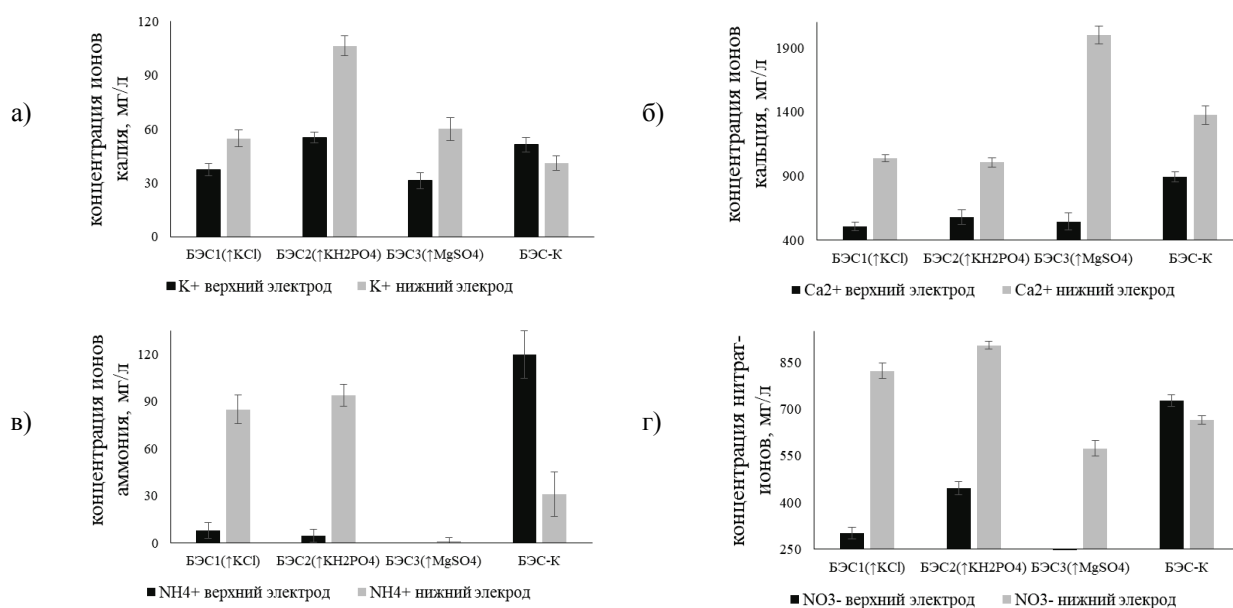
Значения водородного показателя pH в верхней и нижней приэлектродных областях практически не отличались для БЭС1 и БЭС2, тогда как для БЭС3 и БЭС-К они различались более чем на 1 (рис. 4).

Для выявления потенциалобразующих ионов были измерены концентрации  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$  в верхней и нижней приэлектродных областях (рис. 5). Во всех вариантах разработанных БЭС верхний электрод был электроотрицателен относительно нижнего электрода, что коррелирует с полученным содержанием ионов на них – на нижнем электроде больше положительных ионов  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $NH_4^+$ .

В таблице 2 представлены рассчитанные различия в показателях  $\Delta pH$  и концентрациях  $\Delta C$  ионов кальция, калия, аммония, нитрата в верхней и нижней приэлектродных областях БЭС. Видно, что наибольшие отличия в содержании ионов на электродах характерны для ионов кальция – около 500 мг/л для БЭС1, БЭС2 и БЭС-К и почти 1500 мг/л для БЭС3. Можно предположить, что из исследованных элементов ионы  $Ca^{2+}$  вносят решающий вклад в формирования разности потенциалов в корнеобитаемой среде. Для варианта БЭС3, где формировалось повышенное напряжение отмечается большее значение pH на верхнем электроде и большая концентрация ионов  $Ca^{2+}$  в области нижнего электрода.



**Рисунок 4.** Водородный показатель pH в приэлектродных областях верхней и нижней области БЭС с увеличенным в два раза содержанием: БЭС1 – хлорида калия, БЭС2 – дигидроортофосфата калия, БЭС3 – сульфата магния и БЭС-К – контрольный вариант с классическим раствором Кнопа



**Рисунок 5.** Содержание ионов а) калия, б) кальция, в) аммония, г) нитрата в приэлектродных областях верхней и нижней области БЭС с увеличенным в два раза содержанием: БЭС1 – хлорида калия, БЭС2 – дигидроортофосфата калия, БЭС3 – сульфата магния и БЭС-К – контрольный вариант с классическим раствором Кнопа

**Таблица 2.** Различия в показателях  $\Delta pH$  и концентрациях  $\Delta C$  ионов кальция, калия, аммония, нитрата в верхней и нижней приэлектродных областях БЭС с отличающимся составом питательного раствора

Вариант БЭС	$\Delta pH$ ( $pH_{\text{верхний}} - pH_{\text{нижний}}$ электрод – электрод)	$\Delta C(K^+)$ ( $K^+_{\text{верхний}} - K^+_{\text{нижний}}$ электрод – электрод)	$\Delta C(Ca^{2+})$ ( $Ca^{2+}_{\text{верхний}} - Ca^{2+}_{\text{нижний}}$ электрод – электрод)	$\Delta C(NH_4^+)$ ( $NH_4^+_{\text{верхний}} - NH_4^+_{\text{нижний}}$ электрод – электрод)	$\Delta C(NO_3^-)$ ( $NO_3^-_{\text{верхний}} - NO_3^-_{\text{нижний}}$ электрод – электрод)
БЭС1 (↑KCl)	-0,06	-17,4	-534	-77	-522
БЭС2 (↑KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	0,11	-51,2	-427	-89	-460
БЭС3 (↑MgSO <sub>4</sub> ×7H <sub>2</sub> O)	1,28	-28,9	-1456	-1	нет данных
БЭС-К	-1,13	10,3	-483	89	62

Магний является одним из важнейших соединений, участвующих в биосинтезе хлорофилла и повышающим интенсивность фотосинтеза. Увеличение его концентрации в питательном растворе привело не только к росту биомассы, но и улучшению электрических параметров БЭС.

Таким образом, можно сделать вывод, что наряду с нитратной формой азота, сульфат магния может играть потенциалобразующую роль в формировании электрогенных реакций в системе корнеобитаемая среда-растения – создании градиента концентраций ионов, в первую очередь водорода и кальция, что, вероятно, положительным образом отразилось на показателях роста растений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-4397.2022.5).*

#### Список литературы/References:

- Кулешова Т.Э., Галушко А.С., Панова Г.Г., Волкова Е.Н., Аполлон В., Шуан С., Севда С. Биоэлектрохимические системы на основе электроактивности растений и микроорганизмов в корнеобитаемой среде (обзор). *Сельскохозяйственная биология*, 2022, т. 57, № 3, doi: 10.15389/agrobiology.2022.3.425rus [Kuleshova T.E., Galushko A.S., Panova G.G., Volkova E.N., Apollon W., Shuang Ch., Sevda S. Bioelectrochemical systems based on the electroactivity of plants and microorganisms in the root environment (review). *Agricultural Biology*, 2022, vol. 57, no. 3 (In Russ.)].
- Juan A.D. Microbial Fuel Cell-Literature review. Technical evaluation of the microbial fuel cell technology in wastewater applications. *Res. Gate*, 2014, pp. 1-18, doi: 10.13140/2.4481.0569.
- Obileke K., Onyeaka H., Meyer E.L., Nwokolo N. Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. *Electrochemistry Communications*, 2021, vol. 125, doi: 10.1016/j.elecom.2021.107003.

4. Pant D., Van Bogaert G., Diels L., Vanbroekhoven K. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. *Bioresource technology*, 2010, vol. 101, no. 6, doi: 10.1016/j.biortech.2009.10.017.
5. Chiranjeevi P., Yeruva D.K., Kumar A.K., Mohan S.V., Varjani S. Plant-microbial fuel cell technology. In *Microbial electrochemical technology*. Elsevier, 2019, doi: 10.1016/B978-0-444-64052-9.00022-4.
6. Dommergues Y.R., Krupa S.V. Interactions between Non-pathogenic Soil Microorganisms and Plants. *Developments in Agricultural and Managed-Forest Ecology (Book Series)*, Elsevier Science Ltd., Netherlands, 1978.
7. Schroder U. Anodic electron transfer mechanisms in microbial fuel cells and their energy efficiency. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2007, vol. 9, no. 21, pp. 2619-2629, doi: 10.1039/B703627M.
8. Mohan S.V., Mohanakrishna G., Chiranjeevi P. Sustainable power generation from floating macrophytes based ecological microenvironment through embedded fuel cells along with simultaneous wastewater treatment. *Bioresource technology*, 2011, vol. 102, no. 14, doi: 10.1016/j.biortech.2011.04.033.
9. Pamintuan K.R.S., Sanchez K.M. Power generation in a plant-microbial fuel cell assembly with graphite and stainless steel electrodes growing *Vigna Radiata*. *IOP conference series: materials science and engineering*, 2019, vol. 703, no. 1, doi: 10.1088/1757-899X/703/1/012037.
10. Strik D.P.B.T.B., Hamelers H.V.M., Snel J.F., Buisman C.J. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *International Journal of Energy Research*, 2008, vol. 32, no. 9, doi: 10.1002/er.1397.
11. Gulamhussein M., Randall D.G. Design and operation of plant microbial fuel cells using municipal sludge. *J. Water Process. Eng.*, 2020, vol. 38, p. 101653, doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101653.
12. Helder M., Strik D.P., Timmers R.A., Raes S.M., Hamelers H.V., Buisman C.J. Resilience of roof-top plant-microbial fuel cells during Dutch winter. *Biomass and Bioenergy*, 2013, vol. 51, no. 1-7, doi: 10.1016/j.biombioe.2012.10.011.
13. Lu L., Xing D., Ren Z.J. Microbial community structure accompanied with electricity production in a constructed wetland plant microbial fuel cell. *Bioresource technology*, 2015, vol. 195, doi: 10.1016/j.biortech.2015.05.098.
14. Habibul N., Hu Y., Wang Y.K., Chen W., Yu H.Q., Sheng G.P. Bioelectrochemical chromium (VI) removal in plant-microbial fuel cells. *Environmental science & technology*, 2016, vol. 50, no. 7, doi: 10.1021/acs.est.5b06376.
15. Arends J.B., Speeckaert J., Blondeel E., De Vrieze J., Boeckx P., Verstraete W., Rabaey K., Boon N. Greenhouse gas emissions from rice microcosms amended with a plant microbial fuel cell. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014, vol. 98, doi: 10.1007/s00253-013-5328-5.
16. Maddalwar S., Nayak K.K., Kumar M., Singh L. Plant microbial fuel cell: opportunities, challenges, and prospects. *Bioresource Technology*, 2021, vol. 341, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125772.
17. Ahn Y., Logan B.E. Altering anode thickness to improve power production in microbial fuel cells with different electrode distances. *Energy and Fuels*, 2013, vol. 27, no. 1, doi: 10.1021/ef3015553.
18. Wilkinson S., Klar J., Applegarth S. Optimizing biofuel cell performance using a targeted mixed mediator combination. *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis*, 2006, vol. 18, no. 19-20, doi: 10.1002/elan.200603621.
19. Helder M., Strik D.P., Hamelers H.V., Buisman C.J. The flat-plate plant-microbial fuel cell: the effect of a new design on internal resistances. *Biotechnology for biofuels*, 2012, vol. 5, no. 1, doi: 10.1186/1754-6834-5-70.
20. Кулешова Т.Э., Желначева П.В., Гасиева З.А., Галушко А.С., Панова Г.Г. Зависимость биоэлектрического потенциала в корнеобитаемой среде от формы азота в питательном растворе. *Актуальные вопросы биологической физики и химии*, 2022, т. 7, № 4, doi: 10.29039/rusjbpс.2022.0558 [Kuleshova T.E., Zhelnacheva P.V., Gasieva Z.A., Galushko A.S., Panova G.G. Dependence of the bioelectric potential in the root environment on the form of nitrogen in the nutrient solution. *Russian Journal of Biological Physics and Chemistry*, 2022, vol. 7, no. 4 (In Russ.)].
21. Панова Г.Г., Удалова О.Р., Канаш Е.В., Галушко А.С., Кочетов А.А., Прияткин Н.С., Архипов М.В., Черноусов И.Н. Основы физического моделирования «идеальных» агроэкосистем. *Журнал технической физики*, 2020, vol. 90, no. 10, doi: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19 [Panova G.G., Udalova O.R., Kanash E.V., Galushko A.S., Kochetov A.A., Priyatkin N.S., Arkhipov M.V. Chernousov I.N. Fundamentals of Physical Modeling of “Ideal” Agroecosystems. *Technical Physics*, 2020, vol. 65, no. 10 (In Russ.)].
22. Кулешова Т.Э., Бушлякова А.В., Галль Н.Р. Неинвазивное измерение биоэлектрических потенциалов растений. *Письма в Журнал технической физики*, 2019, vol. 45, no. 5, doi: 10.21883/PJTF.2019.05.47387.17541 [Kuleshova T.E., Bushlyakova A.V., Gall N.R. Noninvasive measurement of bioelectric potentials of plants. *Technical Physics Letters*, vol. 45, no. 3 (In Russ.)].
23. Чесноков В.А., Базырина Е.Н., Бушуева Т.М. *Выращивание растений без почвы*. Изд. ЛГУ, 1960 [Chesnokov V.A., Bazyrina E.N., Bushueva T.M. *Vyrashchivanie rastenij bez pochvy*. Izd. LGU, 1960 (In Russ.)].

**IDENTIFICATION OF POTENTIAL-GENERATING IONS IN THE NUTRIENT SOLUTION OF BIOELECTROCHEMICAL SYSTEM****Kuleshova T.E., Zhelnacheva P.V., Gasieva Z.A., Galushko A.S., Panova G.G.**

Agrophysical Research Institute

*Grazhdanskiy pr., 14, Saint-Petersburg, 195220, Russia; e-mail: kuleshova@agrophys.ru*

Received 20.07.2023. DOI: 10.29039/rusjbpс.2023.0618

**Abstract.** The work considers the effect of the nutrient solution composition on the potential difference formation in the root environment. Identification of possible potential-generating ions in bioelectrochemical systems based on electactive plant and microbial interactions was carried out. The electropotential difference in the root environment was measured when growing lettuce with a nutrient solution with a double increased content of magnesium sulfate, potassium chloride and potassium dihydortophosphate. Changes in the electrical conductivity of nutrient solutions in the process of lettuce growing and the differences in the pH and concentrations of calcium, potassium, ammonium, nitrate ions in the upper and lower electrode areas of bioelectrochemical systems are analyzed. An increase in the concentration of potassium chloride and potassium dihydortophosphate in a nutrient solution led to a decrease in both biomass and the average voltage value to 221 mV and 188 mV, respectively, relatively characteristic of the control option with a classic solution of the potential difference 213 mV. The doubling of the magnesium sulfate concentration, on the contrary, caused an increase in the potential difference to an average value of 263 mV and an increase in biomass by more than 30% relative to control. Probably, magnesium sulfate plays a potential role in the formation of electogenic reactions in the root environment.

**Key words:** *plant-microdal fuel cell, panoponica, carbon felt, lettuce.*