

ДИНАМИКА КОНВЕРСИИ СВЕТА ЛИСТЬЯМИ РАСТЕНИЙ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В ПРИКОРНЕВОЙ ЗОНЕ

Кулешова Т.Э.^{1,2}, Желнина А.И.¹, Удалова О.Р.², Панова Г.Г.², Галль Н.Р.¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

ул. Политехническая, 26, г. Санкт-Петербург, 194021, РФ; e-mail: www.piter.ru@bk.ru

² Агрофизический научно-исследовательский институт

пр-т Гражданский, 14, г. Санкт-Петербург, 195220, РФ; e-mail: gaiane@inbox.ru

Поступила в редакцию: 11.07.2020

Аннотация. В работе рассматривается взаимосвязь светопоглощательной способности листьев растений и генерируемых в прикорневой зоне биоэлектрических потенциалов. Для измерения физических параметров состояния растительного организма *in vivo* в процессе развития – динамики поглощения света листьями и электрических биопотенциалов в ризосфере, а также автоматического мониторинга параметров окружающей среды, создана экспериментальная установка на основе неинвазивных датчиков. С помощью разработанного многофункционального метода фитомониторинга измерены корреляция изменений температуры и влажности воздуха, увлажненности корнеобитаемой среды с электрическими свойствами корневой системы и преобразованием световой энергии в условиях искусственного освещения. Получено, что значения биоэлектрических потенциалов (БЭП) варьируют в пределах 40-120 мВ для хлорофитума в течение 1-30 дней его развития и 50-250 мВ для салата на 20-33 сутки вегетационного периода, а величины коэффициентов поглощения меняются от 0,6 до 0,8 для салата и 0,6-0,7 для хлорофитума. Рассчитанные значения эффективности световой конверсии, которая определяется как отношение генерируемой электрической энергии в прикорневой зоне к потребленной растением мощности световой энергии, составили 0,8 ррб для салата, 0,4 ррб для хлорофитума. Полученные результаты могут быть применены для совершенствования технологии получения экологически чистой зеленой энергии, базирующейся на преобразовании энергии света в электричество с помощью растительно-микробных топливных элементов.

Ключевые слова: биоэлектрический потенциал, поглощение света, неинвазивное измерение, датчики, Arduino.

Процессы поглощения света и питательных веществ взаимосвязаны. С одной стороны, растения влияют на свойства, направленность и интенсивность процессов трансформации соединений в прикорневой зоне, выделяя более 20 % ассимилированного в ходе фотосинтеза углерода. Их экссудаты включают в себя сахара, аминокислоты, органические кислоты, нуклеотиды, флаваноны, фенольные соединения и ферменты [1]. В свою очередь выделяемые ризодепозиты влияют на pH почвы, транспорт воды, доступность кислорода, и могут использоваться в жизнедеятельности микроорганизмов [2]. С другой стороны, состояние ризосферы – водный режим, транспорт ионов, оказывают действие на транспирацию и оптические свойства листовой поверхности [3]. Кроме того, метаболические реакции, протекающие в ходе поглощения корневой системой питательных элементов, способствуют созданию электрического градиента потенциалов в корнеобитаемой среде.

Впервые способность живых организмов к биоэлектrogenезу была показана Л. Гальвани в конце 18 века. Считается, что возникновение электрических потенциалов связано с наличием в клетках избирательно проницаемых для ионов мембранных структур [4]. Различия в концентрациях ионов (K^+ , Ca^{2+} , Cl^- , NO_3^- , $H_2PO_4^-$, SO_4^{2-} и др.) внутри и снаружи клеток является причиной возникновения трансмембранного потенциала [5]. Наличие вариации биопотенциалов в прикорневой зоне являются следствием метаболических процессов – в первую очередь, поглощения питательных веществ и транспорта ионов. Также в самой почве и корнеобитаемой среде отдельно существуют электрические поля, связанные с диффузионной электродвижущей силой (ЭДС), мембранными ЭДС, диффузионно-адсорбционными потенциалами в водонасыщенных средах и т.д. [6]. Обменная адсорбция веществ в системе корнеобитаемая среда-растение – ионов H^+ на катионы; анионов HCO_3^- , OH^- и органических кислот на минеральные анионы [7], приводит к возникновению разности потенциалов вдоль корневой системы. При этом сами корни выступают в качестве ЭДС, наряду с окислительно-восстановительными реакциями в ризосфере.

По всей вероятности, величина генерируемого в прикорневой зоне электрического тока должна определяться степенью конверсии света – главного поставщика энергии для растительного организма.

Изучение механизмов биоэлектrogenеза является актуальной задачей как с фундаментальной точки зрения – природа возникновения биоэлектрических потенциалов (БЭП) в настоящее время до конца не определена, так и для прикладных исследований – необходимость совершенствования систем фитомониторинга [8] и растительно-микробных топливных элементов [9, 10].

Цель настоящей работы заключалась в исследовании динамики поглощения света листьями растений и одновременной генерации в прикорневой зоне биоэлектрических потенциалов.

В качестве объектов для исследования были выбраны модельное растение – хлорофитум хохлатый (*Chlorophytum comosum* (Thunb.) Jacques) и сельскохозяйственнозначимая культура – салат (*Lactuca sativa* L.)

сорта Азарт. Листья хлорофитума и салата являются удобным объектом для изучения светопоглощательных свойств, так как имеют большую поверхность, кроме того, усвоенная салатом энергия света тесно связана с продуктивностью растительной культуры. Также, оба объекта достаточно быстро растут и имеют развитую, густую корневую систему, что позволяет изучать стабильно генерируемые в прикорневой зоне биоэлектрические потенциалы уже на ранних стадиях развития.

Растения выращивали в лабораторном фитотроне в условиях искусственного освещения. Источниками света служили светодиодные лампы (Navigator, Китай), излучающие теплый белый свет. Продолжительность светового периода составляла 12 часов в сутки. В качестве корнеобитаемой среды был взят универсальный готовый питательный грунт Terra Vita (Россия), содержащий не менее 150 мг/мл азота (NH_4+NO_3), 270 мг/мл фосфора (P_2O_5), 300 мг/мл калия (K_2O).

Контроль параметров окружающей среды – температуры, влажности, освещенности, а также состояния растительного организма осуществлялся с помощью системы неинвазивных датчиков и микроконтроллера. Все параметры регистрировались автоматически каждые 15 минут в процессе развития растений. Общий вид измерительной системы представлен на рисунке 1. Установка включает в себя: 1) емкость для выращивания, заполненную почвогрунтом, и объект исследования (позиция 1); 2) систему электродов с выводами из емкости, выполненную из коррозионностойкого материала и содержащую отверстия для прорастания корней и обеспечения тем самым поверхностного электрического контакта (позиция 2); 3) цифровой 16-битный датчик GY-302 на чипе BH1750, содержащий фотодиод, чувствительный к видимому свету и практически не подверженный влиянию инфракрасного излучения, для измерения освещенности с точностью ± 1 Лк (позиция 3); 4) датчик DHT11, состоящий из термистора и емкостного датчика влажности, с диапазоном измерения температуры от 0°C до 50°C с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$, диапазоном измерения влажности от 20 до 80% с точностью 5% (позиция 4); 5) аппаратную платформу Arduino Uno, построенную на микроконтроллере ATmega328, с разрешением аналоговых входов 10 бит (позиция 5) и соединительные провода. Датчик освещенности BH1750 имеет следующие выводы: VCC (питание), GND (земля), SCL (линия тактирования), SDA (линия данных), которые подключаются к источнику напряжения 5В, выводу заземления, аналоговым входам A4 и A5 на Arduino, соответственно. Датчик температуры и влажности DHT11 содержит выводы VCC (питание), GND (земля), DATA (вывод данных), которые подключаются к источнику напряжения 5В, выводу заземления, цифровому входу pin 2 на Arduino, соответственно.

Биоэлектрические потенциалы прикорневой зоны регистрировались с помощью разработанного нами неинвазивного метода [11]. Измерение биоэлектрических потенциалов, в зависимости от подключаемой нагрузки, связано с передачей доли энергии от исследуемого объекта к измерительному прибору. Высокое входное сопротивление аппаратной платформы (10^5 Ом) позволяют проводить измерения в режиме, который в минимальной степени отбирает ток от тестируемого объекта и изменяет его физиологическое состояние. В соответствии с полярностью электроды подключались к аналоговому входу A0 и выводу заземления GND на

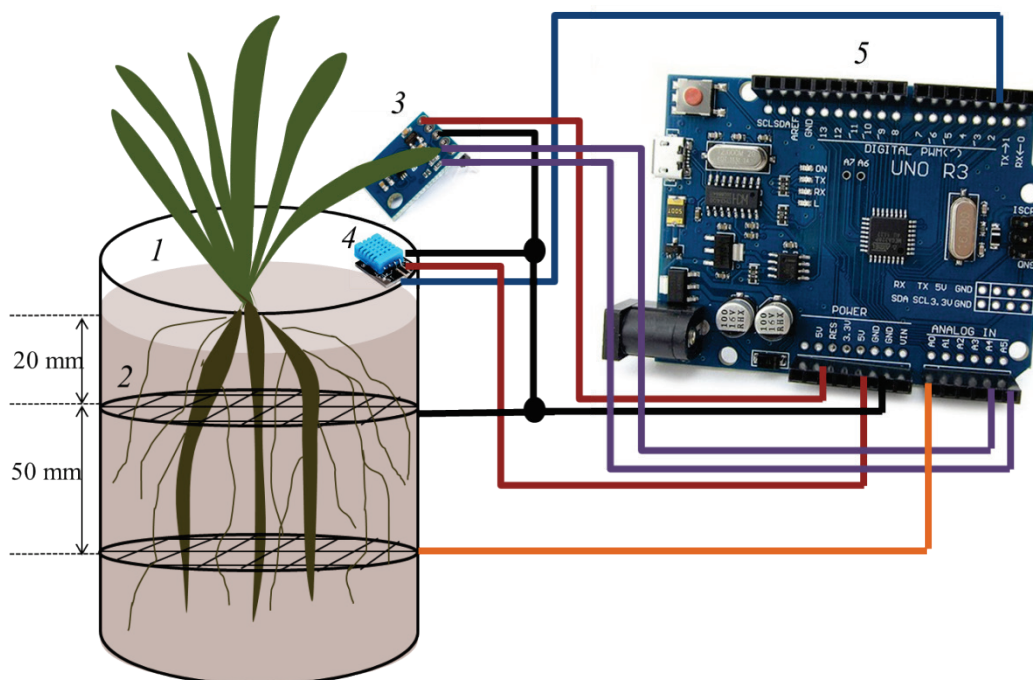


Рисунок 1. Схематичное изображение экспериментальной установки, включающей: 1 – исследуемый образец в емкости для выращивания, заполненной почвогрунтом, 2 – систему электродов для измерения биопотенциалов прикорневой зоны, 3 – датчик освещенности, 4 – датчик температуры и влажности, 5 – аппаратную платформу

Arduino. В большинстве случаев корневая шейка заряжена электроотрицательно по отношению к кончикам корней, то есть верхний электрод отрицательный, а нижний положительный.

Для измерения доли поглощенной энергии света листьями исследуемых растений *in vivo* использован датчик освещенности ВН1750. Датчик размещается под листовой поверхностью в фиксированном положении и позволяет измерять динамику пропускания света сквозь исследуемый объект. Тогда коэффициент поглощения света A листьями может быть рассчитан по формуле:

$$A = \frac{k \cdot \Phi - \Phi_T}{\Phi}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, учитывающий отражение от листа; Φ (лм) – интенсивность светового потока, приходящего на лист; Φ_T (лм) – интенсивность прошедшего сквозь лист света, автоматически регистрируемая каждые 15 минут с помощью фотодиода. В данной работе сделаем некоторое приближение и предположим, что количество отраженного света в видимом диапазоне остается практически постоянным для рассматриваемого периода развития растений. Опираясь на проведенное ранее исследование [12], будем считать, что коэффициент отражения равен 0,2.

В результате изучения динамики конверсии света листьями салата в биоэлектрические потенциалы в прикорневой зоне получены следующие результаты. Средняя температура окружающей среды составила 24 °С, причем в условиях светового дня величина температуры была 25±3 °С, а при темновом режиме опускалась до 22±1 °С (рис. 2а). Влажность воздуха изменяли от 10% до 60%. Средняя величина влажности составила 36%. Для светового и темнового режима наблюдалось уменьшение и увеличение содержания водяного пара в атмосферном воздухе (рис. 2б), обратное изменениям температуры.

Изменения параметров окружающей среды, связанные со сменой дня и ночи, играют важную роль в жизнедеятельности растений. В частности, они влияют на интенсивность транспирации, которая в свою очередь оказывает действие на градиент электрических потенциалов в корнеобитаемой среде. Связь между амплитудой колебаний интенсивности транспирации, скоростью жидкости в транспортной системе растения и уровнем освещенности была показана в [13]. Нами выявлено, что при включении света наблюдается плавный рост БЭП (~ на 10%) до середины светового дня и затем плавное падение до начальной величины [14]. Такая циклическая динамика биопотенциалов, видимо, является следствием поглощения воды и движения минеральных веществ вместе с водным потоком.

Сравнение динамики пропускания света листовой пластиной растения салата и значений БЭП в прикорневой зоне показало некоторую корреляцию этих величин (рис. 3а). При развитии растения, листовая пластина становится более оптически плотной, при этом величина проходящего сквозь лист светового потока постепенно уменьшается. На стадии, соответствующей технической спелости зеленой массы (30-32 день эксперимента), регистрируемая датчиком освещенность под листом растениям снижается в ~3 раза, в то время как БЭП увеличивается в ~2,5 раза. Рост биопотенциала по большей части является следствием увлажнения почвогрунта и уменьшения за счет этого электрического сопротивления корнеобитаемой среды. При этом

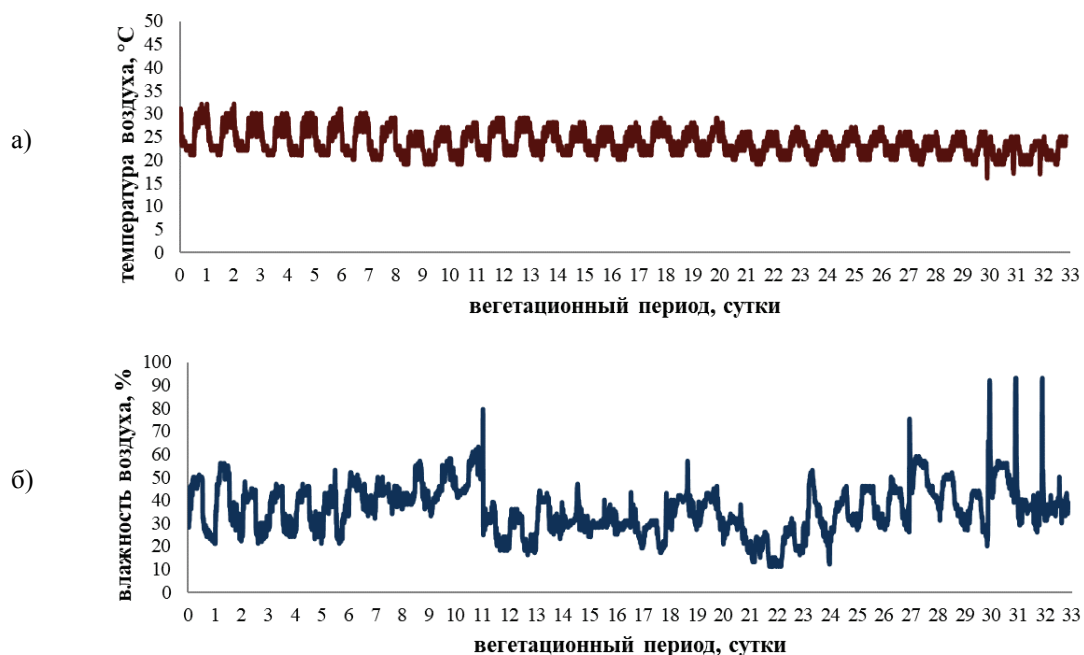


Рисунок 2. Параметры окружающей среды при культивировании салата: суточная динамика температуры воздуха (а) и влажности воздуха (б)

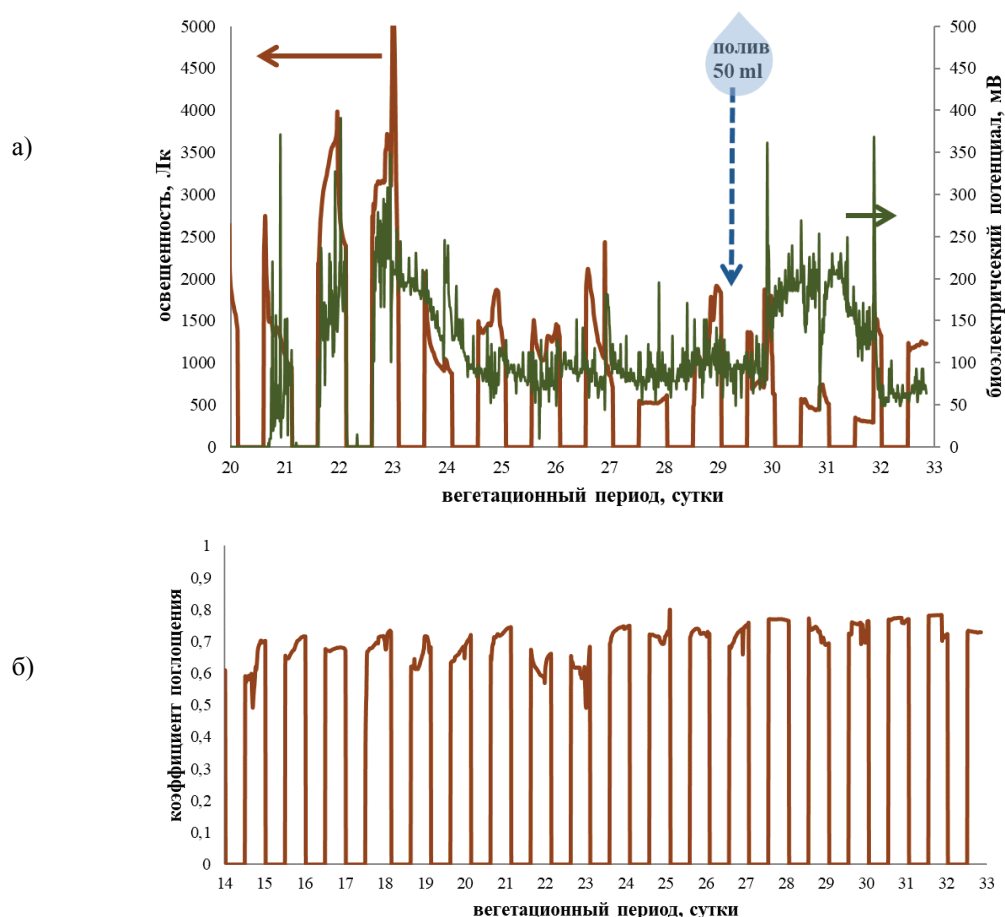


Рисунок 3. Динамики пропускания света листовой поверхностью салата и биоэлектрических потенциалов в прикорневой зоне (а) и изменение коэффициента поглощения в процессе развития салата (б)

наблюдаемый скачок до 350 мВ, видимо, отражает, некоторое физиологическое состояние из-за перепада водного потенциала – изменение гидростатического давления в корнеобитаемой среде при том же корневом давлении.

На рисунке 3б отображены рассчитанные по формуле 1 коэффициенты поглощения, варьируемые от 0,6 до 0,8 в процессе развития салата. В большинстве случаев можно отметить некоторое увеличение поглощения ~ на 3% в течение светового дня.

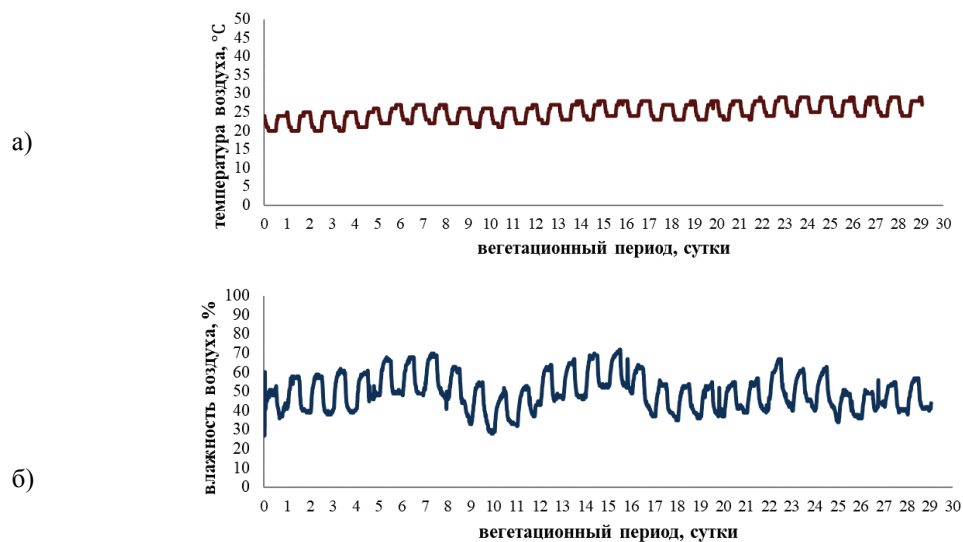


Рисунок 4. Параметры окружающей среды при выращивании хлорофитума: суточная динамика температуры воздуха (а) и влажности воздуха (б)

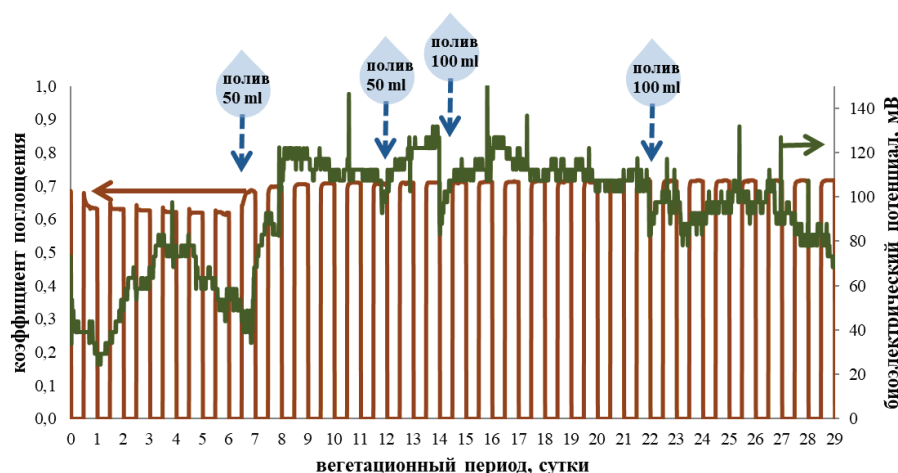


Рисунок 5. Динамики поглощения света листовой поверхностью хлорофитума и биоэлектрических потенциалов в прикорневой зоне

При изучении динамики конверсии света листьями хлорофитума в биоэлектрические потенциалы в прикорневой зоне получены схожие результаты. Температура и влажность также варьируют в пределах 20-28 °С и 30-70 %, соответственно, в зависимости от светового режима и водного режима растения (рис. 4).

На рисунке 5 представлено сравнение динамики поглощения света листьями хлорофитума и генерируемых в прикорневой зоне биоэлектрических потенциалов. Хотя листья хлорофитума более оптически плотные, тем не менее величина коэффициента поглощения света лежит в том же диапазоне – 0,6-0,7, что и для растений салата. Однако наблюдается меньшее изменение в процессе развития, что, по-видимому, связано с тем, что хлорофитум многолетнее растение, имеет большую продолжительность жизни и более медленную скорость роста листовой пластины.

Рост светопоглощательной способности листьев хлорофитума наблюдается на 7 день развития и коррелирует с увеличением биопотенциала, вызванным также увлажнением почвогрунта.

Проведем примерный расчет эффективности световой конверсии K , определяемой как отношение генерируемой электрической энергии в прикорневой зоне к потребленной растением мощности световой энергии:

$$K = \frac{P_{\text{ризосфера}}}{P_{\text{свет}}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{ризосфера}}$ (Вт) – выработанная мощность электроэнергии в ризосферной среде, $P_{\text{свет}}$ (Вт) – поток излучения, поглощенный листом растения. Так как напрямую мы эти величины не регистрируем, необходимо сделать некоторые приближения и перевести экспериментально полученные значения пропускания света листовой поверхностью (измеренные в единицах освещенности) и электрические свойства прикорневой зоны (измеренные как разность потенциалов) в энергетические единицы мощности.

На основе полученных коэффициентов поглощения света листьями A и измеренной величины освещенности E (лк), приходящей на растение, а также с учетом площади листовой поверхности растения S (м²), световой эффективности источника света η (лм/Вт), величину $P_{\text{свет}}$ можно рассчитать, как:

$$P_{\text{свет}} = \frac{S \cdot A \cdot E}{\eta}, \quad (3)$$

Вырабатываемая в ризосферной зоне мощность рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{ризосфера}} = I \cdot U, \quad (4)$$

где I (А) – электрический ток в корнеобитаемой среде, U (В) – величина биоэлектрического потенциала.

Тогда средняя величина эффективности световой конверсии составит для салата $0,8 \cdot 10^{-9}$ или 0,8 ppb, для хлорофитума $400 \cdot 10^{-9}$ или 0,4 ppm.

Таким образом, с помощью созданного многофункционального метода фитомониторинга получено, что БЭП варьируют в пределах 40-120 мВ для хлорофитума в течение 1-30 дней его развития и 50-250 мВ для салата на 20-33 сутки вегетационного периода, а величины коэффициентов поглощения меняются от 0,6 до 0,8 для салата и 0,6-0,7 для хлорофитума. Экспериментально полученные зависимости позволяют сделать вывод о связи процессов поглощения энергии света листьями и генерации биоэлектрических потенциалов в ризосфере. Данный эффект может быть использован для повышения эффективности растительно-микробного топливного элемента за счет увеличения светопоглощательных свойств листьев. Низкая эффективность конверсии световой энергии в

электрическую в ризосферной зоне рассчитанная на данном этапе – 0,8 ppb для салата, 0,4 ppb для хлорофитума, лишь указывает на возможности и пути увеличения этого значения для дальнейшего использования при получении экологически чистой энергии.

Список литературы / References:

1. Azri Y.M., Tou I., Sadi M., Benhabyles L. Bioelectricity generation from three ornamental plants: Chlorophytum comosum, Chasmanthe floribunda and Papyrus diffusus. *International Journal of Green Energy*, 2018, vol. 15, no. 4. DOI: 10.1080/15435075.2018.1432487.
2. Tou I., Azri Y.M., Sadi M., Lounici H., Kebbouche-Gana S. Chlorophytum microbial fuel cell characterization. *International Journal of Green Energy*, 2019, vol. 16, no. 12. DOI: 10.1080/15435075.2019.1650049.
3. Ильницкий О.А., Радченко С.С., Лискер И.С., Палий И.Н., Радченко Н.С. Оптические свойства листьев растений в ближнем инфракрасном излучении в связи с их водным режимом. *Бюллетень Государственного Никитского ботанического сада*, 2007, № 94. [Il'nitsky O.A., Radchenko S.S., Lisker I.S., Paly I.N., Radchenko N.S. The optical properties of plant leaves in near infrared radiation in connection with their water regime. *Bulletin of the State Nikitsky Botanical Garden*, 2007, no. 94. (In Russ.)]
4. Опритов В.А., Пятыгин С.С., Ретивин В.Г. *Биоэлектрогенез у высших растений*. М.: Наука, 1991, 216 с. [Opritov V.A., Pyatygin S.S., Retivin V.G. *Bioelectrogenesis in higher plants*. М.: Nauka, 1991, 216 p. (In Russ.)]
5. Опритов В.А. Электричество в жизни животных и растений. *Соросовский образовательный журнал*, 1996, no. 9. [Opritov V.A. Electricity in the life of animals and plants. *Soros Educational Journal*, 1996, no. 9. (In Russ.)]
6. Поздняков А.И., Позднякова Л.А., Позднякова А.Д. *Стационарные электрические поля в почвах*. М: КМК Scientific Press Ltd, 1996, 358 с. [Pozdnyakov A.I., Pozdnyakova L.A., Pozdnyakova A.D. *Stationary electric fields in soils*. М: KMK Scientific Press Ltd, 1996, 358 p. (In Russ.)]
7. Медведев С.С. *Физиология растений: учебник*. СПб.: БХВ-Петербург, 2012, 512 с. [Medvedev S.S. *Plant Physiology: A Textbook*. SPb: BHV-Petersburg, 2012, 512 p. (In Russ.)]
8. Hasegawa Y., Hoshino R., Uchida H. Development of cultivation environment control system using plant bioelectric potential. *Proceedings of NOLTA*, 2015.
9. Strik D.P., 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.
10. Chiranjeevi P., Yeruva D. K., Kumar A. K., Mohan S. V., Varjani S. Plant-Microbial Fuel Cell Technology. *Microbial Electrochemical Technology*. Elsevier, 2019. DOI: 10.1016/B978-0-444-64052-9.00022-4.
11. Кулешова Т.Э., Бушлякова А.В., Галль Н.Р. Неинвазивное измерение биоэлектрических потенциалов растений. *Письма в ЖТФ*, 2019, т. 45, № 5. [Kuleshova T.E., Bushlyakova A.V., Gall N.R. Noninvasive measurement of bioelectric potentials of plants. *Technical Physics Letters*, vol. 45, no. 3. DOI: 10.1134/S1063785019030106. (In Russ.)]
12. Кулешова Т.Э., Черноусов И.Н., Удалова О.Р., Аникина Л.М., Хомяков Ю.В., Александров А.В., Середин И.С., Фефанов С.В., Щеглов С.А., Галль Н.Р., Панова Г.Г. Влияние спектральных особенностей световой среды на поглощение света листьями салата и его нетто-продуктивность. *Биофизика*, 2020, т. 65, № 1. DOI: 10.31857/S0006302920010147. [Kuleshova T.E., Chernousov I.N., Udalova O.R., Anikina L.M., Khomyakov Yu.V., Aleksandrov A.V., Seredin I.S., Feofanov S.V., Shcheglov S.A., Gall N.R., Panova G.G. The influence of the spectral properties of the lighting environment on light absorption by lettuce leaves and the net productivity of lettuce. *Biofizika*, 2020, vol. 65, no. 1. DOI: 10.1134/S0006350920010121. (In Russ.)]
13. Мелешенко С.Н., Карманов В.Г. Математическая модель водного обмена растения с учетом механизма положительной обратной связи. *Биофизика*, 1966, т. 11, № 3. [Meleschenko S.N., Karmanov V.G. A mathematical model of water metabolism of a plant, taking into account the mechanism of positive feedback. *Biophysics*, 1966, vol. 11, no. 3. (In Russ.)]
14. Кулешова Т.Э., Шеина И.Ю., Черноусов И.Н., Удалова О.Р., Блохин Ю.И., Александров А.В., Жестков А.С., Панова Г.Г., Галль Н.Р. Комплекс неинвазивных измерений оптических свойства листьев и биопотенциалов растений для фитомониторинга. *Материалы II Международной научной конференции «Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего», посвященной памяти академика Е.И. Ермакова*. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2019. [Kuleshova T.E., Sheina I.Yu., Chernousov I.N., Udalova O.R., Blokhin Yu.I., Aleksandrov A.V., Zhestkov A.S., Panova G.G., Gall N. R. A complex of non-invasive measurements of the optical properties of leaves and plant biopotentials for phytomonitoring. *Materials of the II International Scientific Conference "Trends in the Development of Agrophysics: from Actual Problems of Agriculture and Plant Growing to Future Technologies", dedicated to the memory of Academician E.I. Ermakova*. SPb.: FGBNU AFI, 2019. (In Russ.)]

DYNAMICS OF LIGHT CONVERSION BY PLANTS LEAVES IN ELECTRICITY IN A ROOT ZONE

Kuleshova T.E.^{1,2}, Zhelnina A.I.¹, Udalova O.R.², Panova G.G.², Gall N.R.¹¹ Ioffe Institute*Polytechnical str., 26, St. Petersburg, 194021, Russia; e-mail: www.piter.ru@bk.ru*² Agrophysical Research Institute*Grazhdansky pr., 14, St. Petersburg, 195220, Russia; e-mail: gaiane@inbox.ru*

Abstract. The work is devoted to the interrelation of the light absorption by plant leaves and bioelectric potentials generated in the rhizosphere. The experimental setup based on non-invasive sensors has been made to measure *in vivo* the physical parameters of the plant state in the process of development – the dynamics of light absorption by leaves and biopotentials in the rhizosphere, as well as automatic monitoring of environmental parameters. The correlation of temperature and air humidity, humidity of the root habitat changes with the electrical properties of the root system and the conversion of light energy under artificial lighting were measured using the developed multifunctional method of phytomonitoring. It was registered that values of bioelectric potentials (BEP) vary within 40-120 mV for chlorophytum during 1-30 days of its development and 50-250 mV for lettuce on days 20-33 of the growing season, and the absorption coefficients vary from 0.6 up to 0.8 for salad and 0.6-0.7 for chlorophytum. The calculated values of the light conversion efficiency, which is defined as the ratio of the generated electric energy in the root zone to the light energy consumed by the plant, were 0.8 ppb for lettuce, 0.4 ppm for chlorophytum. The results can be applied to improve the technology for environmentally friendly green energy, based on the conversion of light energy into electricity - plant-microbial fuel cells.

Key words: *bioelectric potential, light absorption, non-invasive measurement, sensors, Arduino.*