

УДК 577.359

ЭЛЕКТРОГЕНЕЗ В КОРНЕОБИТАЕМОЙ СРЕДЕ РАЗЛИЧНЫХ СОРТОВ САЛАТА

© 2024 г. Т.Э. Кулешова*., З.А. Гасиева*, Д.В. Русаков*, А.С. Галушко*, Г.Г. Панова*

*Агрофизический научно-исследовательский институт, Гражданский просп., 14, Санкт-Петербург, 195220, Россия

#E-mail: www.piter.ru@bk.ru

Поступила в редакцию 15.02.2023 г.

После доработки 03.09.2023 г.

Принята к публикации 06.09.2023 г.

Биоэлектрохимические системы на основе электроактивных процессов в корнеобитаемой среде растений являются перспективным направлением совмещенного производства зеленой электроэнергии и растительной продукции. В работе исследованы динамики формирования разности потенциалов в корнеобитаемой среде, индексы диффузного отражения листьев, параметры флуоресценции, морфометрические и биохимические характеристики салата сортов Китайский курчавый, Китайский красно-зеленый, Балет, Кокарда, Меркурий, Дубрава, Робин и гибрида F₁ Solos. Максимальная разность потенциалов – 430 мВ была характерна для сорта Меркурий, а минимальная – 352 мВ – для сорта Китайский курчавый. По сумме параметров, в дополнение к электрическим, включающих морфометрические, биохимические и фотосинтетические характеристики, лучшим был салат сорта Балет. В перспективе на основе полученных данных возможно создание агрофитоценозов, включающих растения, способные к высокой и стабильной генерации электроэнергии наряду с большой продуктивностью и хорошим качеством получаемой растительной продукции за счет эффективного усвоения и преобразования энергии света.

Ключевые слова: биоэлектрохимическая система, растительно-микробный топливный элемент, интенсивная светокультура, активность фотосинтетического аппарата, растительная продукция.

DOI: 10.31857/S0006302924010113, EDN: RARLXW

В настоящее время остро стоит проблема исчерпаемости основных видов ресурсов – энергетических и продовольственных. Возобновляемая энергия рассматривается как один из способов облегчения топливных потребностей будущего, преодоления кризиса глобального потепления и снижения выбросов углекислого газа, а использование альтернативных гибридных энергоресурсов совмещенного назначения позволяет эффективно сочетать производственные процессы.

Преобразование энергии с помощью живых организмов рассматривается как устойчивый источник зеленой энергетики будущего [1]. Одними из наиболее распространенных биоэнергетических устройств являются микробные топливные элементы, преобразующие энергию химических связей органических веществ в электричество посредством экзоэлектрогенных бактерий. Основной принцип работы таких элементов заключается в генерации электронов и протонов в анодной камере при окислении органических веществ микроорганизмами, электроны транспортируют-

ся по внешней электрической цепи к их акцепторам (например, кислороду, нитрату) в катодной камере, а протоны переносятся в катодную камеру через сепаратор (например, ионообменную мембрану) или электролит [2]. Микробные топливные элементы имеют потенциал применения для производства электроэнергии и биоремедиации сточных вод [3]. В то же время одним из развивающихся направлений является применение биотехнологических устройств в сельском хозяйстве для совмещенного получения электроэнергии и растительной продукции [4].

Биоэлектрохимические системы на основе электроактивных процессов в корнеобитаемой среде растений и сопутствующих им микроорганизмов, называемые также растительно-микробными топливными элементами, представляют собой модифицированные элементы, в которых субстратом для электроактивных бактерий выступают ризодепозиты [5]. Эти элементы продемонстрировали большой потенциал не только в производстве зеленого электричества, например для электропитания беспроводных датчиков для фи-

Сокращение: ФС II – фотосистема II.

томониторинга [4], но и в эффективном удалении углекислого газа [6].

Считается, что электрический заряд в растительно-микробных топливных элементах создается в основном в процессе метаболизма электроактивных бактерий, а его разделение реализуется в первую очередь за счет наличия градиента окислительно-восстановительного потенциала в среде. В связи с этим в большинстве таких элементов используются водные растения [6], так как при этом катод располагается в верхнем слое воды водоемов, а анод в твердой корнеобитаемой среде. В последнее время также разрабатываются биоэлектрохимические системы на основе гидропонных систем выращивания [7].

Между тем известно, что и сами растения способны к электрогенезу. Возникновение разности потенциалов в живых системах обусловлено комплексом физико-химических процессов, обеспечивающих поддержание неравномерного распределения ионов на клеточном, тканевом и организменном уровнях. В процессе развития растений вдоль всего организма возникает градиент электрического потенциала, обусловленный диффузией ионов, концентрационными эффектами и различиями в интенсивностях биохимических процессов. Показано, что электрические сигналы участвуют во многих процессах в жизни растений [8], включая дыхание [9], поглощение воды [10], движение листьев [11] и реакцию на биотический стресс [12].

Между различными участками растительных тканей существуют метаболические потенциалы — градиенты электрических потенциалов, отражающие различный уровень обмена веществ на этих участках [13]. Метаболические потенциалы обусловлены различной интенсивностью физиологических процессов, обычно участок с более интенсивным обменом становится более электроотрицательным по отношению к окружающим тканям. Также в растениях возникают потенциалы покоя, которые могут достигать больших значений (160–180 мВ) и включают в себя диффузионную компоненту, связанную с градиентами концентраций потенциал-определяющих ионов и коэффициентами проницаемости их через плазматическую мембрану, и метаболическую компоненту, генерация которой осуществляется работой транспортной АТФазы (H^+ –АТФазы) [14]. Потенциалы покоя выполняют энергетическую, регуляторную, защитную функции и участвуют в процессах морфогенеза [14]. Сигнальную роль выполняет потенциал действия [15]. Ионный механизм генерации потенциала действия заключается в следующем: восходящая фаза деполяризации связана с возникновением входящего в цитозоль клеток потока Ca^{2+} и выходящего потока Cl^- , а нисходящая фаза реполяризации с

выходящим из клеток потоком ионов K^+ [16, 17]. Также в генерации потенциала действия у растений принимают участие электрогенные ионные насосы [16, 18]. Генерация потенциала действия сопряжена со значительными ионными сдвигами (до десятков миллимолей) [16] и с проходящим изменением активности АТФ-зависимого протонного электронного насоса плазматической мембраны [19].

Градиенты биоэлектрического потенциала растений являются следствием различий в интенсивности процессов роста, фотосинтеза, дыхательного обмена, ионного транспорта и некоторых других процессов и отражают различия между потенциалами покоя клеток [13]. Изменение метаболических потенциалов в ответ на различные внешние воздействия, включая условия освещения, влажности, температуры, выступает как перспективный инструмент для выявления стрессовых состояний растений на ранних стадиях [20]. Установлено, что свет инициирует электрофизиологический ответ, в частности облучение растений сои при 450 ± 50 , 670 и 730 нм индуцирует потенциалы действия с длительностью 0.3 мс и амплитудой ~60 мВ [21]. А при повреждении тканей растения у вертикально ориентированных корней отмечалось усиление электрического тока, выходящего из зоны корневых волосков и входящего в зону растяжения, с 1–2 мкА/см² до 10 мкА/см² [22].

Таким образом, растения, способные к биоэлектрогенезу в процессе развития, и электроактивные бактерии, обитающие в корнеобитаемой среде, являются новым перспективным регенеративным природным энергоресурсом, снижающим ущерб окружающей среде и позволяющим эффективно совмещать производственные процессы. Производительность биоэлектрохимических систем на основе электрогенных процессов в системе «корнеобитаемая среда–растения», наряду с конфигурацией устройства [23] и используемыми электродами [24], зависит от целого ряда факторов, включая вид растения — его генетически обусловленный потенциал, способность к ризоосаждению [25], свойств корнеобитаемой [26] и световой [27] сред, наличие микроорганизмов и их электроактивность [28]. Хотя возможность практического использования биоэнергетических ресурсов уже показана во многих исследованиях [29–31], тем не менее промышленное масштабное применение пока отсутствует [32], так как, наряду с экономической эффективностью, еще предстоит раскрыть природу электрогенеза, включая его зависимость от генетически обусловленных физиологических особенностей растений и их состояния на протяжении развития.

Цель данного исследования заключалась в изучении динамики формирования разности по-



Рис. 1. Общий вид биоэлектрохимических систем на основе различных растений салата: 1 – гибрида F₁ Solos и сортов: 2 – Китайский курчавый, 3 – Китайский красно-зеленый, 4 – Меркурий, 5 – Дубрава, 6 – Балет, 7 – Робин, 8 – Кокарда в вегетационно-облучательной установке «Экофил» на 12-е, 15-е и 22-е сутки вегетационного периода.

тенциалов в корнеобитаемой среде биоэлектрохимических систем на основе различных сортов салата, отличающихся активностью фотосинтетических процессов в листьях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования служили растения листового салата (*Lactuca sativa* L.). Для выбора растений, наиболее перспективных с точки зрения получения электроэнергии в ходе их выращивания, было проведено исследование электрофизиологических свойств у ряда представителей листового салата, различающихся эффективностью работы фотосинтетического аппарата: гибрид F₁ Solos, сорт Китайский курчавый, сорт Китайский красно-зеленый, сорт Балет, сорт Кокарда (коллекция ФИЦ ВИР, Санкт-Петербург), сорт Меркурий (Компания «Гавриш», Москва), сорт Дубрава (ООО «Флагман», Ростовская обл.), сорт Робин (АО «Сортсеменовощ», Санкт-Петербург).

Растения выращивали в регулируемых условиях интенсивной светокультуры на биополитоне Агрофизического НИИ в вегетационно-облучательной установке «Экофил» [33]. Источником света служили разработанные нами светодиодные светильники со спектральным составом в видимой области, приближенным к

естественному свету, величина плотности фотосинтетического потока фотонов составляла 180 ± 20 мкмоль/(м²·с), продолжительность светового периода – 14 ч в сутки. Температура воздуха поддерживалась в пределах 20–22°C днем и 18–20°C ночью, относительная влажность воздуха – 65–70%. В качестве корнеобитаемой среды использовали торфяной грунт «АгроБалт С» (ООО «Пиндstrup», Санкт-Петербург).

Биоэлектрохимическая ячейка представляла собой емкость объемом 440 см³. Измерение электрических характеристик осуществляли путем размещения биосовместимых коррозионостойких электродов размером 60 × 60 мм в корнеобитаемой среде, что обеспечивало поверхностный электрический контакт с корневой системой и прикорневой зоной [34]. Нижний электрод располагался на расстоянии 30 мм от дна емкости и был выполнен из графитового войлока толщиной 5 мм. Верхний электрод из сетки из нержавеющей стали с размером ячейки 8 × 8 мм размещался на расстоянии 30 мм от нижнего электрода и был электроотрицателен по отношению к нему. Мониторинг изменения разности потенциалов проводили с помощью аппаратной платформы Arduino каждые 15 мин в течение всего вегетационно-

го периода. Вид экспериментальной установки представлен на рис. 1.

Различия в фотосинтетической активности растений салата оценивали по индексам диффузного отражения листовой пластинки, определяющих содержание хлорофилла, содержание антоцианов, меру рассеяния света листом, и по параметрам флуоресценции, которые регистрировали на 14-е, 21-е и 28-е сутки вегетационного периода.

Спектры отраженной от поверхности листьев радиации регистрировали неинвазивным способом с помощью миниатюрной оптоволоконной спектрометрической системы (Ocean Optics, США), которая обеспечивает оптическое разрешение 0.065 нм в диапазоне от 400 до 1100 нм с шагом 0.3 нм. Для регистрации спектров датчик располагали в средней части листовой пластинки, избегая попадания на центральную жилку. В среднем для каждого варианта регистрировали 10–15 спектров. По полученным спектрам отражения рассчитывали следующие параметры, коррелирующие с фотосинтетической активностью и отражающие физиологическое состояние растений [35]:

– индекс отражения хлорофилла $ChlRI = (R_{750} - R_{705}) / (R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$, где R_{750} , R_{705} , R_{445} – интенсивность отражения света от листовой поверхности на длинах волн 750, 705 и 445 нм соответственно;

– индекс отражения антоцианов $ARI = R_{750} \times (1/R_{550} - 1/R_{700}) + C_1$, где R_{750} , R_{550} , R_{700} – интенсивность отражения света от листовой поверхности на длинах волн 750, 550 и 700 нм соответственно, $C_1 = 0.4$ – константа, подобранная экспериментально [35];

– индекс интенсивности рассеяния света R_{800} , обусловленной структурными особенностями листьев и определяемый как интенсивность отражения на длине волны 800 нм.

Параметры флуоресценции фотосистемы II (ФС II) листьев исследуемых салатов регистрировали с помощью анализатора эффективности фотосинтеза – импульсного портативного флуориметра MINI-PAM-II (Walz, Германия) в соответствии со стандартной методикой [36]. Уровень минимальной (возбуждается светом с очень низкой интенсивностью) и максимальной (возбуждается насыщающим световым импульсом) флуоресценции определяли после экспозиции листьев в течение 30 мин в темноте. С использованием специального программного обеспечения WinControl-3 рассчитывали следующие параметры флуоресценции:

– максимальный фотохимический квантовый выход $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$, где F_0 – уровень ми-

нимальной флуоресценции, F_m – уровень максимальной флуоресценции;

– эффективный фотохимический или реальный квантовый выход $Y(II) = (F_m - F_t)/F_m$, где F_m – максимальный выход флуоресценции адаптированного к свету образца, индуцируется насыщающим импульсом, временно закрывающим все реакционные центры ФС II, F_t – мгновенный или стационарный уровень флуоресценции адаптированного к свету образца, измеренному прямо перед насыщающим импульсом.

Уборку растений осуществляли на 28-е сутки от посева семян. При уборке учитывали сырую массу и высоту растений. Биохимический состав получаемой растительной продукции определяли титро-, фото- и ионометрическими методами в аккредитованной Испытательной лаборатории Агрофизического НИИ в соответствии с требованиями нормативных документов.

Вегетационный опыт проводили дважды, с четырехкратной повторностью исследуемых вариантов в каждом эксперименте. Статистическую обработку данных проводили с применением программ Excel 2010 и Statistica 8.0. Определяли средние значения изучаемых показателей, доверительные интервалы. Достоверность различий между вариантами оценивали с использованием однофакторного дисперсионного анализа с последующим подсчетом рангового критерия Дункана. Различия между вариантами считали достоверными при $p \leq 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ранее в работе [37] нами была показана роль растений в формировании электрогенных реакций в корнеобитаемой среде – были измерены разности потенциалов в биоэлектрохимической системе, содержащей питательный раствор без растений (контроль) и с растениями на примере салата сорта Тайфун. На начальном этапе эксперимента в питательном растворе наблюдалась генерация разности потенциалов порядка 70–100 мВ, по-видимому, являющейся следствием различий в концентрациях составляющих компонентов питательного раствора на верхнем и нижнем электродах. Можно сказать, что питательный раствор выступает аналогом электролита в гальваническом элементе. С течением времени напряжение в контрольной ячейке спадало, скорее всего, вследствие выравнивания концентраций. При выращивании растений разность потенциалов, наоборот, увеличивалась до ~200 мВ и была стабильна на протяжении всего вегетационного периода. Вероятно, увеличение напряжения в биоэлектрохимической системе при размещении в ней растительных объектов было связано с развитием корневой системы, жизнедеятельностью

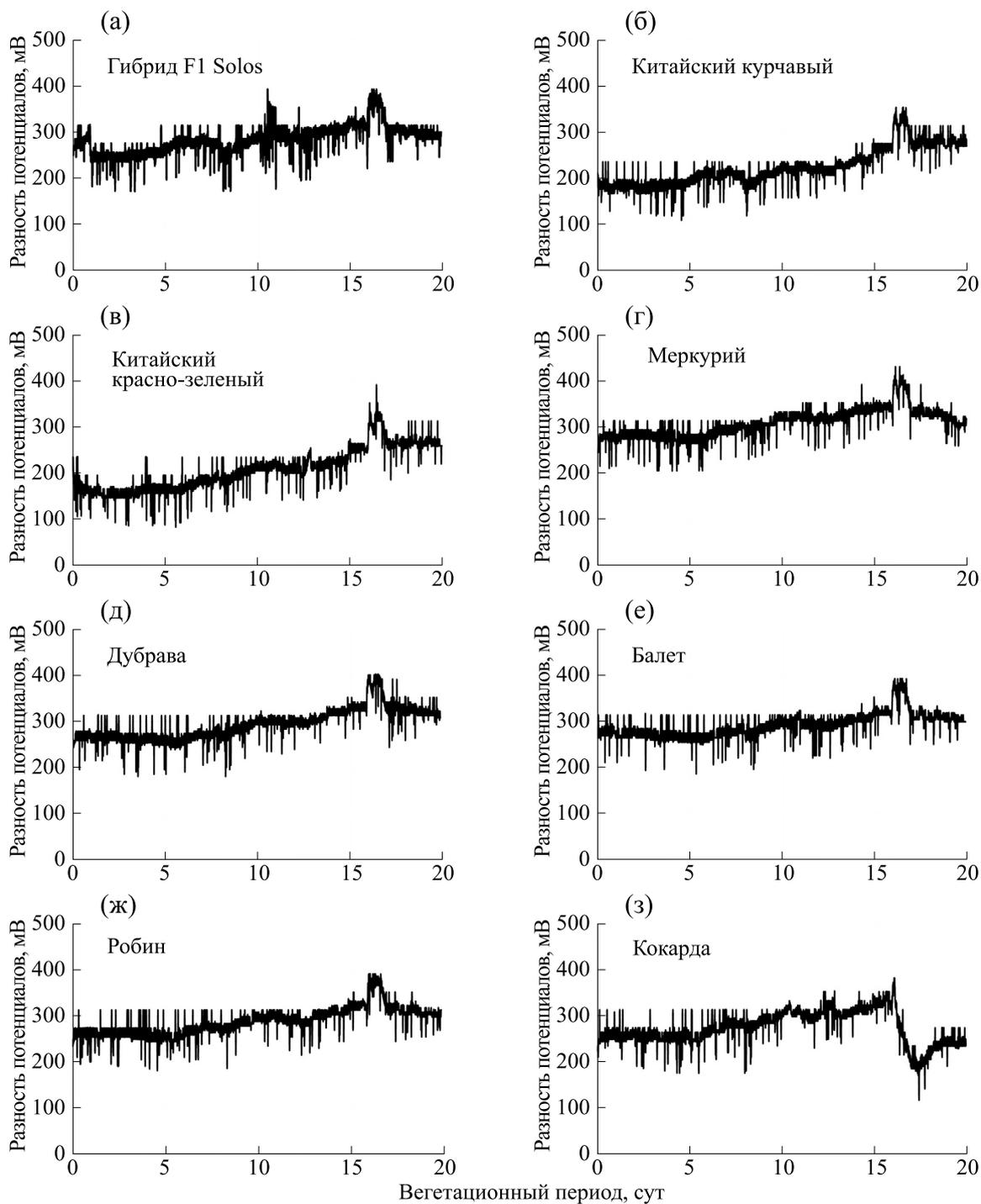


Рис. 2. Динамика разности потенциалов, формируемой в корнеобитаемой среде, при выращивании растений салата: (а) гибрида F_1 Solos, (б) сорта Китайский курчавый, (в) сорта Китайский красно-зеленый, (г) сорта Меркурий, (д) сорта Дубрава, (е) сорта Балет, (ж) сорта Робин, (з) сорта Кокарда.

сопутствующих микроорганизмов, транспортом минеральных веществ и, как следствие, усилением диффузионных процессов.

Для сравнения электрических параметров различных растений салата и выбора сорта, наиболее

перспективного с точки зрения продуктивности и получения электроэнергии, была изучена динамика разности потенциалов, формируемых в корнеобитаемой среде в процессе роста растительных культур (рис. 2). Изменение разности потенциалов в процессе вегетационного периода для

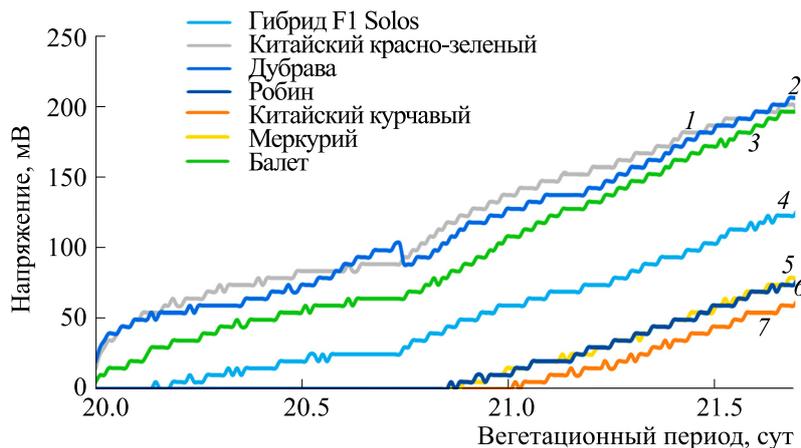


Рис. 3. Динамика зарядки ионистора емкостью 0.1 Ф от биоэлектрохимических систем на основе различных салатов: 1 — сорта Китайский красно-зеленый, 2 — сорта Дубрава, 3 — сорта Балет, 4 — гибрида F₁ Solos, 5 — сорта Робин, 6 — сорта Меркурий, 7 — сорта Китайский курчавый.

исследованных растений салата оказалось схожим — наблюдалась равномерная генерация ~200 мВ в течение 10 суток, после чего происходил плавный рост до 300 мВ и более к 15-м суткам и затем стабилизация.

В целом по величине генерируемого в системе «корнеобитаемая среда—растения» напряжения салаты можно расположить в следующем порядке (от наибольшего среднего значения к меньшему): сорт Меркурий (306 мВ) > сорт Дубрава (291 мВ) > сорт Балет (289 мВ) > сорт Робин (286 мВ) > гибрид F₁ Solos (281 мВ) > сорт Кокарда (272 мВ) > сорт Китайский курчавый (221 мВ) > сорт Китайский красно-зеленый (206 мВ).

Максимальная разность потенциалов (430 мВ) была также характерна для сорта Меркурий, а минимальная (352 мВ) — для сорта Китайский курчавый.

Полученные значения напряжений в биоэлектрохимических системах на основе различных салатов были зарегистрированы без внешней нагрузки в электрической цепи, то есть фактически они соответствуют нормальному состоянию, когда растения не отдают электрический ток потребителю. Для выявления возможностей накопления и использования электроэнергии, генерируемой в системе «корнеобитаемая среда—растения», к каждой биоэлектрохимической системе был параллельно подключен ионистор емкостью 0.1 Ф. Динамика накопления заряда ионистора представлена на рис. 3. Напряжение ионисторов, подключенных к биоэлектрохимическим системам на основе салатов сортов Робин, Меркурий и Китайский курчавый, по сравнению с сортами Китайский красно-зеленый, Дубрава и Балет, было ниже почти на 130 мВ, а по сравнению с гибридом F₁ Solos — на 50 мВ.

По накопленной на ионисторе (или отданной растениями) энергии через 40 ч зарядки в пересчете на 1 м² зоны роста в биоэлектрохимической системе салаты расположились в следующем порядке: сорт Дубрава (0.58 Дж) ≥ сорт Китайский красно-зеленый (0.56 Дж) ≥ сорт Балет (0.53 Дж) > гибрид F₁ Solos (0.21 Дж) > сорт Меркурий (0.08 Дж) ≥ сорт Робин (0.07 Дж) ≥ сорт Китайский курчавый (0.05 Дж).

При этом увеличение напряжения на ионисторе за час, то есть скорость зарядки, в период с 21-х по 22-е сутки вегетационного периода составило: сорт Балет (5.3 мВ/ч) ≥ сорт Дубрава (5.0 мВ/ч) > сорт Меркурий (4.3 мВ/ч) > сорт Китайский красно-зеленый (3.9 мВ/ч) = гибрид F₁ Solos (3.9 мВ/ч) = сорт Робин (3.9 мВ/ч) ≥ сорт Китайский курчавый (3.5 мВ/ч).

В ходе проведения эксперимента состояние растений дополнительно оценивали по изменению пропускания света листовой поверхностью по методике, описанной в работе [38]. Этот параметр отрицательно коррелирует с интенсивностью поглощения света листовой пластинкой — чем больше ее пропускающая способность, тем меньше световой энергии она поглощает. Было отмечено, что динамика пропускания света листом коррелирует с изменением разности потенциалов в корнеобитаемой среде в ходе вегетации — при уменьшении интенсивности пропускания, то есть увеличении поглощения света листом, росла и величина напряжения биоэлектрохимической ячейки (рис. 4). Так, например, коэффициент корреляции r между динамикой пропускания света листом и изменением напряжения в биоэлектрохимической системе на основе салата сорта Меркурий составил $r = -0.77$ в световой период. Критерий существенности ко-

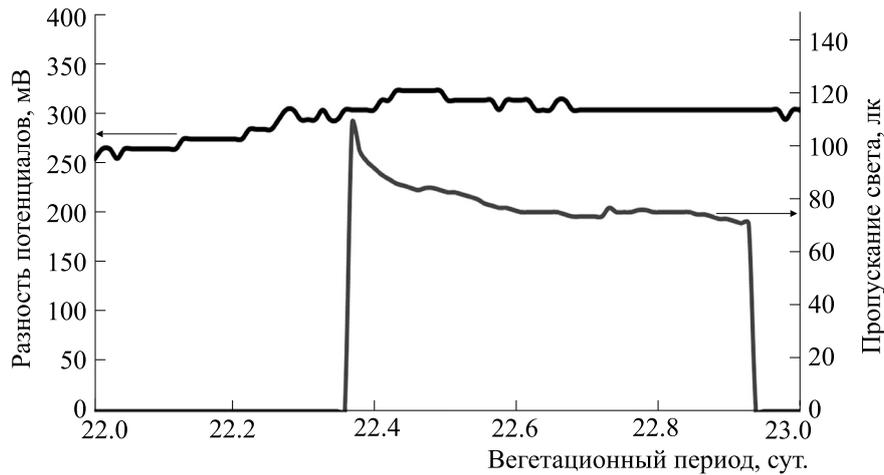


Рис. 4. Динамика пропускания света листом и разности потенциалов, формируемой в корнеобитаемой среде салата сорта Меркурий.

эфициента корреляции t_r составил 8.63, что значительно выше теоретического ($t_{0.05} = 2.01$), из чего следует, что полученный коэффициент корреляции существенен.

Для выявления фактора, связанного с интенсивностью электрогенных свойств растений, были измерены показатели преобразования и усвоения энергии света листьями растений — индексы диффузного отражения и параметры флуоресценции в процессе вегетации.

На рис. 5 представлены полученные индексы, отражающие содержание хлорофиллов и антоцианов в исследуемых салатах. Коэффициент корреляции r между индексами отражения, характеризующими содержание пигментов, и их количеством, определенным с помощью биохимического анализа, составил $r = 0,7$ для хлорофилла на 28-е сутки вегетации и $r = 0,8$ для антоцианов на 14-е сутки вегетации. Критерий существенности коэффициента корреляции t_r составил 2.40 для хлорофилла и 2.87 для антоцианов при $t_{0.05} = 2.45$, что говорит о существенной корреляции только между индексом ARI и количеством антоцианов.

Индекс хлорофилла $ChlRI$ может служить характеристикой емкости фотосинтетического аппарата и потенциальной способности растения к поглощению энергии света. Увеличение значений индекса хлорофилла $ChlRI$ в большинстве случаев сопровождается ростом эффективности превращения энергии света в фотохимических процессах фотосинтеза. Наибольшее содержание хлорофилла зафиксировано для сортов Дубрава, Балет и Кокарда. Также можно отметить тенденцию уменьшения содержания хлорофилла в листьях в течение вегетационного периода для ги-

брида F_1 Solos и сортов Меркурий, Дубрава и Робин.

Избыточное накопление антоцианов может свидетельствовать о наличии окислительного стресса [39]. Большие величины индекса антоцианов ARI , характерные для гибрида F_1 Solos, связаны, возможно, с присутствием абиотического стресса у растений. Меньшие же величины индекса антоцианов ARI , отмечаемые для сортов Китайский курчавый, Дубрава, Балет и Кокарда, могут говорить о большей эффективности фотосинтетических процессов в этих салатах. Интересно отметить, что только для сорта Дубрава наблюдается увеличение индекса антоцианов ARI со временем.

Полученные данные свидетельствуют о сильной обратной корреляции индекса антоцианов ARI в опыте к индексу хлорофилла $ChlRI$, где она составила $r = -0.72$ ($t_r = 2.55 > t_{0.05} = 2.45$, коэффициент существенен) на 14-е сутки вегетации и $r = -0,66$ ($t_r = 2.32 < t_{0.05} = 2.45$, коэффициент не существен) на 21-е сутки. Однако на 28-е сутки эксперимента корреляция индексов снижается до $r = -0.19$ ($t_r = 0.48 > t_{0.05} = 2.45$, коэффициент не существен).

Исходя из вышеописанных результатов в отношении наибольшего содержания фотосинтетических пигментов можно выделить сорта Дубрава, Балет и Кокарда.

На рис. 6 приведены индексы интенсивности рассеяния света R_{800} для исследуемых растений салата. Наибольшая величина этого индекса, указывающая на неэффективное использование энергии приходящего на листа света, характерна для гибрида F_1 Solos на ранних стадиях, что коррелирует с высокой величиной индекса ARI и

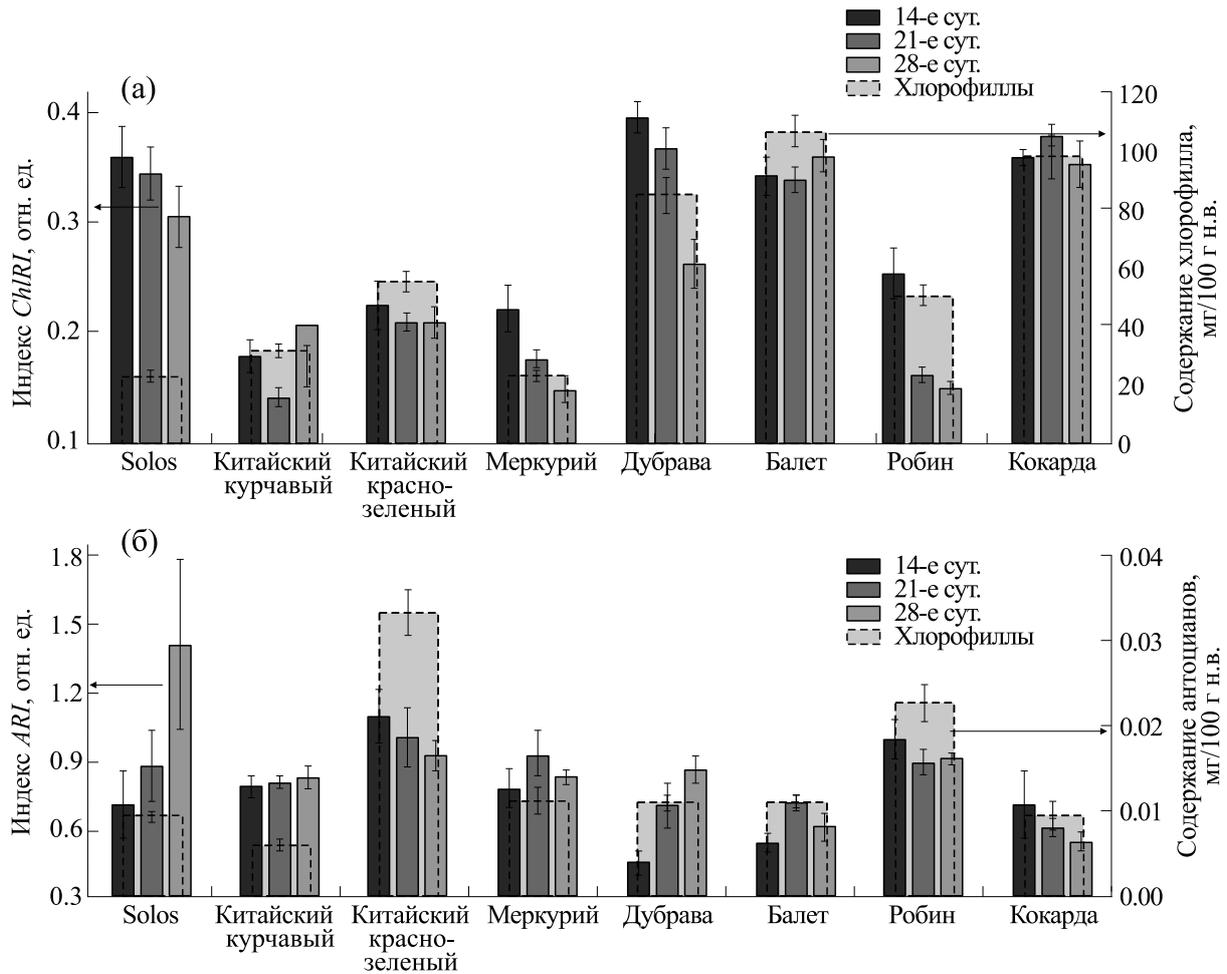


Рис. 5. Индексы диффузного отражения листьев, определяющие содержание хлорофилла *ChlRI* (а) и содержание антоцианов *ARl* (б), и пигментный состав листьев для растений салата гибрида F₁ Solos и сортов Китайский курчавый, Китайский красно-зеленый, Меркурий, Дубрава, Балет, Робин, Кокарда, выращиваемых в биоэлектрохимических системах на 14-е, 21-е и 28-е сутки вегетационного периода.

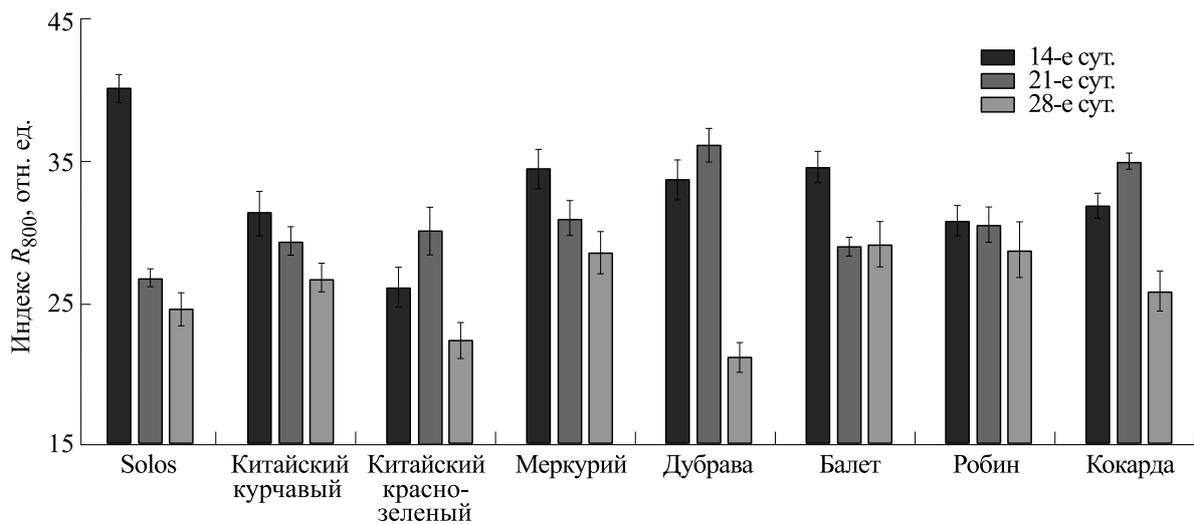


Рис. 6. Мера рассеяния света листом *R₈₀₀* для растений салата гибрида F₁ Solos и сортов Китайский курчавый, Китайский красно-зеленый, Меркурий, Дубрава, Балет, Робин, Кокарда, выращиваемых в биоэлектрохимических системах на 14-е, 21-е и 28-е сутки вегетационного периода.

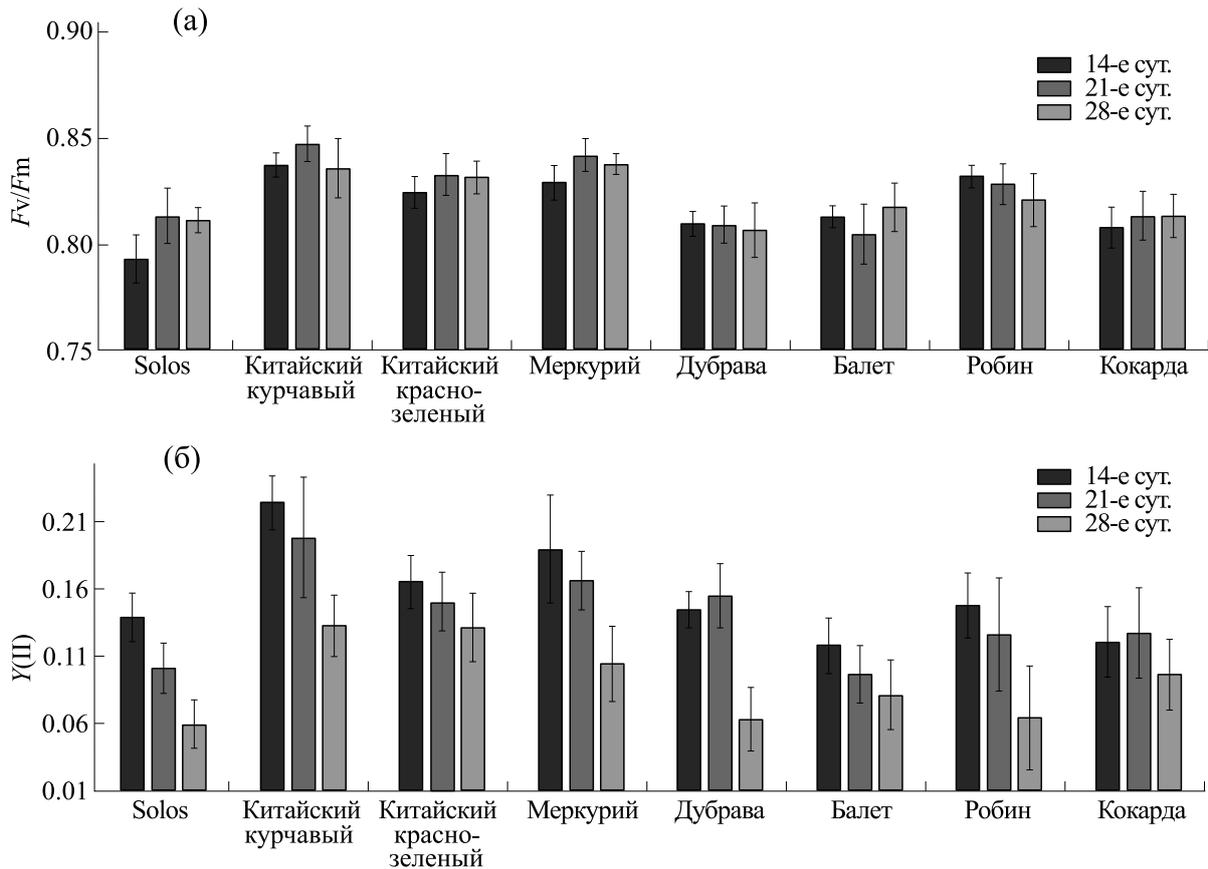


Рис. 7. Параметры флуоресценции: (а) – максимальный квантовый выход F_v/F_m , (б) – реальный квантовый выход $Y(II)$ для растений салата гибрида F_1 Solos и сортов Китайский курчавый, Китайский красно-зеленый, Меркурий, Дубрава, Балет, Робин, Кокарда, выращиваемых в биоэлектрохимических системах, на 14-е, 21-е и 28-е сутки вегетационного периода.

подтверждает предположение о его меньшей приспособленности к условиям интенсивной светокультуры. В целом значения между вариантами отличаются незначительно: различия составляют 16–35% на 14-е сутки вегетации, 7–23% на 21-е сутки и 5–26% на 28-е сутки вегетации. Возможно, это связано со схожими механизмами защиты фотосинтетического аппарата от света высокой интенсивности путем его рассеивания в одинаковых условиях выращивания в интенсивной светокультуре. Интересно отметить снижение рассеяния света R_{800} для гибрида F_1 Solos и сорта Дубрава к концу вегетационного периода почти в два раза.

Также было проведено измерение флуоресценции хлорофилла, полученные параметры различных растений салата представлены на рис. 7. Квантовый выход фотосинтеза характеризует эффективность использования растением света при фотосинтезе, а флуоресценция хлорофилла предоставляет информацию о том, как световая энергия, поглощенная хлорофиллом, влияет на степень использования энергии ФС II. Наиболь-

ший максимальный квантовый выход F_v/F_m , отражающий потенциальный квантовый выход ФС II, был характерен для сортов Китайский курчавый, Китайский красно-зеленый, Меркурий и Робин, а наибольший реальный квантовый выход $Y(II)$ – для сортов Китайский курчавый и Меркурий. Для всех вариантов исследованных растений значение $Y(II)$ снижалось к концу вегетационного периода.

По окончании вегетационного периода были измерены масса надземной части, высота растений и их биохимический состав.

В табл. 1 приводится сравнение морфометрических характеристик растений салата и электрических показателей биоэлектрохимической системы. По выходу растительной продукции с одной биоэлектрохимической ячейки салаты расположились в следующем порядке: сорт Балет (113.1 г) > сорт Кокарда (82.0 г) ≥ сорт Меркурий (71.0 г) > сорт Китайский красно-зеленый (58.0 г) ≥ сорт Робин (54.6 г) > сорт Китайский курчавый (48.1 г) ≥ сорт гибрид f_1 Solos (47.8 г) ≥ сорт Дубрава (42.6 г).

Таблица 1. Электрические и морфометрические характеристики различных сортов салата при их выращивании в биоэлектрохимической системе

Сорт салата	Среднее значение разности потенциалов в системе «корнеобитаемая среда–растения», мВ	Максимальное значение разности потенциалов в системе «корнеобитаемая среда–растения», мВ	Масса надземной части растений в одной ячейке, г	Высота растений, см
Solos F1	281 ± 32 ^a	391	47.8 ± 6.6 ^{ef}	19.7 ± 1.0 ^d
Китайский курчавый	221 ± 42 ^b	352	48.1 ± 7.5 ^{ef}	23.1 ± 2.0 ^c
Китайский красно-зеленый	206 ± 47 ^b	391	58.0 ± 6.3 ^d	29.9 ± 2.2 ^b
Меркурий	306 ± 32 ^a	430	71.0 ± 9.3 ^c	24.0 ± 1.7 ^c
Дубрава	291 ± 35 ^a	400	42.6 ± 8.3 ^f	33.1 ± 1.4 ^a
Балет	289 ± 27 ^a	391	113.1 ± 15.8 ^a	31.7 ± 2.1 ^{ab}
Робин	286 ± 31 ^a	391	54.6 ± 4.6 ^{de}	29.9 ± 1.9 ^b
Кокарда	272 ± 37 ^a	381	82.0 ± 7.4 ^b	32.5 ± 1.8 ^a

Примечание. Данные с одинаковыми буквами (a–f) по столбцам статистически не различаются при $p \leq 0.05$ (критерий Дункана).

Однофакторный дисперсионный анализ выявил достоверные различия в генерируемой в корнеобитаемой среде разности потенциалов, массе и высоте растений в биоэлектрохимических системах на основе различных сортов салата. Так, в вариантах с сортами Китайский курчавый и Китайский красно-зеленый наблюдались достоверные отличия от остальных исследованных вариантов по величине напряжения. Следует отметить, что салат сорта Дубрава при высоких значениях генерации тока показал наименьшие значения массы надземной части растений, что, по-видимому, связано с генетически обусловленными особенностями данного сорта.

В табл. 2 описаны полученные биохимические показатели, характеризующие качество растительной продукции. Можно отметить большее накопление сухого вещества в салатах сортов Китайский красно-зеленый, Дубрава и Балет относительно такового в остальных исследованных сортах и гибриде. Наиболее низкое содержание нитратов наблюдалось в растениях салата сорта Меркурий, высокое – в растениях сорта Кокарда. При этом по содержанию нитратов в растительной продукции она полностью соответствовала санитарно-гигиеническим требованиям Российской Федерации [40]. Наибольшее количество сахаров было присуще сорту Балет, а витамина С – сорту Кокарда. Для салата гибрида F₁ Solos и сорта Китайский курчавый характерно повышенное содержание сырой золы, а также железа, меди и цинка, для сортов Меркурий и Китайский красно-зеленый – марганца, для сорта Балет – кальция.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основе полученных данных были сформированы представления об электрогенных процессах, протекающих в системе «корнеобитаемая среда–растения» различных растений салата. На ранних этапах наблюдаемая в корнеобитаемой среде генерация разности потенциалов связана со свойствами питательной среды, которая выступает аналогом электролита. Со временем в системе без растений напряжение снижается вследствие выравнивания концентраций ионов на электродах. В биоэлектрохимической системе, содержащей вегетирующие растения, наоборот, с ростом растений наблюдается увеличение разности потенциалов, вероятно, связанное с развитием корневой системы и жизнедеятельностью сопутствующих микроорганизмов.

Для улучшения выходных электрических характеристик было проведено измерение электрогенных свойств корнеобитаемой среды различных салатов, отличающихся интенсивностью фотосинтетических процессов в листьях. Из исследованных вариантов с точки зрения генерации наибольшей разности потенциалов в системе «корнеобитаемая среда–растения» можно выделить салат сорта Меркурий: максимальное напряжение в биоэлектрохимической системе на его основе достигало 430 мВ, а среднее значение составило 306 мВ. При этом накопленная энергия была больше при использовании в качестве энергоресурса биоэлектрохимической системы на основе салата сорта Дубрава: энергия ионистора после 40 ч зарядки составила 0.58 Дж в пересчете на 1 м² зоны роста. Полученные данные по электри-

Таблица 2. Биохимические показатели различных сортов салата при их выращивании в биоэлектрохимической системе

Показатели	Сорт салата							
	F1 Solos	Китайский курчавый	Китайский красно-зеленый	Меркурий	Дубрава	Балет	Робин	Кокарда
Влажность, %	95.7	95.7	94.0	95.0	93.9	94.2	94.9	94.9
Сухое вещество, %	4.3	4.3	6.0	5.1	6.1	5.8	5.2	5.1
Сырая зола, % а.с.в.	25.3	23.1	22.4	21.6	22.1	21.6	19.8	21.4
Сумма сахаров, % а.с.в.	5.1	5.6	8.0	7.1	7.5	12.0	10.7	7.2
Витамин С, мг/100 г н.в.	7.0	11.0	10.8	8.4	11.2	8.8	9.7	12.3
Нитраты, мг/кг н.в.	1362	1256	1204	920	1590	1650	1256	1906
Азот, % а.с.в.	3.6	3.5	4.0	3.7	3.9	3.7	3.9	4.2
Фосфор, % а.с.в.	0.8	0.9	0.7	0.8	0.7	0.8	0.8	0.7
Калий, % а.с.в.	10.7	9.5	9.0	7.8	9.2	7.5	8.3	8.0
Кальций, % а.с.в.	2.2	2.2	2.2	2.3	1.9	2.9	1.9	1.9
Магний, % а.с.в.	0.4	0.4	0.6	0.5	0.5	0.6	0.5	0.6
Железо, мг/кг а.с.в.	132.1	132.8	108.1	98.9	97.9	84.2	106.2	129.5
Медь, мг/кг а.с.в.	6.0	3.6	3.0	2.8	2.4	2.0	2.1	2.3
Цинк, мг/кг а.с.в.	20.9	17.7	14.1	14.1	13.4	12.0	13.2	13.8
Марганец, мг/кг а.с.в.	38.9	44.9	51.2	54.6	42.4	41.0	38.2	41.9

Примечание. а.с.в. – Абсолютно сухое вещество, н.в. – натуральная влажность.

ческим характеристикам напрямую не коррелировали с продуктивностью растительных культур, наибольшая масса надземной части одной ячейки (113 г) была характерна для салата сорта Балет.

Для выявления наиболее перспективных для использования в биоэлектрохимических системах растений с точки зрения комплексности присутствующих им электрических, фотосинтетических, морфометрических и биохимических характеристик была проведена сортировка исследованных салатов по измеренным параметрам (табл. 3). В первой строке приведены растения с более высокими значениями оцениваемых характеристик, им присваивается 8 баллов за каждый пункт, а в последней строке представлены салаты с наименьшими величинами полученных показателей, им дается 1 балл. На основе этого для каждого образца была рассчитана сумма баллов рейтинга: сорт Балет набрал 60 баллов, сорт Китайский красно-зеленый – 56 баллов, сорт Дубрава – 55 баллов, сорт Кокарда – 55 баллов, сорт Меркурий – 49 баллов, сорт Робин – 42 балла, сорт Китайский курчавый – 42 балла, гибрид F₁ Solos – 36 баллов. Таким образом, можно выделить сорт Балет как отличающийся наилучшим комплексом и электрических, и морфологических, и биохимических, и фотосинтетических характеристик.

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований получено, что лучшими электрогенными свойствами в системе «корнеобитаемая среда–растения» обладают салаты сорта Меркурий и Дубрава. Однако по сумме параметров, в дополнении к электрическим, включающих морфометрические, биохимические и фотосинтетические характеристики, можно выделить салат сорта Балет.

В перспективе на основе полученных данных возможно создание высокоэффективных многофункциональных агрофитоценозов, включающих растения, способные к высокой и стабильной генерации электроэнергии и растений с высокой реализацией потенциала продуктивности, формирующих высококачественную растительную продукцию за счет эффективного усвоения и преобразования энергии света.

Показанная возможность использования электрогенеза в системе «корнеобитаемая среда–растения» в качестве нового зеленого источника электроэнергии имеет большой потенциал использования, в первую очередь, в сельском хозяйстве для обеспечения электропитанием маломощных устройств мониторинга состояния окружающей среды и параметров растений, а также частичного электроснабжения устройств поддержки жизнедеятельности растений в искусственных агроэкосистемах.

Таблица 3. Сортировка исследованных растений салата по убыванию: разности потенциалов, формируемой в корнеобитаемой среде, генерируемой биоэлектрохимической системой энергии, продуктивности растительной продукции, сухого вещества, суммы сахаров, витамина С, индекса хлорофилла *ChlRI*, максимального квантового выхода F_V/F_M , реального квантового выхода $Y(II)$, и увеличению: индекса антоцианов *ARI*, меры рассеяния света листом R_{800}

Балл	По средней разности потенциалов ↑	По генерируемой энергии ↑	По продуктивности растительной продукции ↑	По сухому веществу ↑	По сумме сахаров ↑	По витамину С ↑	По индексу ChlRI на 28-е сутки ↑	По индексу ARI на 28-е сутки ↓	По индексу R800 на 28-е сутки ↓	По F_V/F_M на 28-е сутки ↑	По $Y(II)$ на 28-е сутки ↑
8	Меркурий	Дубрава	Балет	Балет	Кит. кр-зел.	Дубрава	Балет	Кокарда	Дубрава	Меркурий	Кит. курчавый
7	Дубрава	Кит. кр-зел.	Кокарда	Робин	Кокарда	Solos	Кокарда	Балет	Кит. кр-зел.	Кит. курчавый	Кит. кр-зел.
6	Балет	Балет	Меркурий	Кит. кр-зел.	Дубрава	Кокарда	Solos	Меркурий	Solos	Кит. кр-зел.	Меркурий
5	Робин	Solos	Кит. кр-зел.	Дубрава	Кит. курчавый	Балет	Дубрава	Кит. курчавый	Кокарда	Робин	Кокарда
4	Solos	Меркурий	Робин	Кокарда	Робин	Робин	Кит. кр-зел.	Дубрава	Кит. курчавый	Балет	Балет
3	Кокарда	Робин	Кит. курчавый	Меркурий	Балет	Кит. кр-зел.	Кит. курчавый	Робин	Меркурий	Кокарда	Робин
2	Кит. курчавый	Кит. курчавый	Solos	Кит. курчавый	Меркурий	Меркурий	Робин	Кит. кр-зел.	Робин	Solos	Дубрава
1	Кит. кр-зел.	Нет данных (Кокарда)	Дубрава	Solos	Solos	Кит. курчавый	Меркурий	Solos	Балет	Дубрава	Solos

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Sayed E. T., Abdelkareem M. A., Obaideen K., Elsaid K., Wilberforce T., Maghrabie H. M., and Olabi A. G. Progress in plant-based bioelectrochemical systems and their connection with sustainable development goals. *Carbon Resources Conversion*, **4**, 169–183 (2021). DOI: 10.1016/j.crcon.2021.04.004
- Logan B. E. *Microbial fuel cell* (John Wiley & Sons, 2008).
- Pant D., Singh A., Van Bogaert G., Olsen S. I., Nigam P. S., Diels L., and Vanbroekhoven K. Bioelectrochemical systems (BES) for sustainable energy produc-

tion and product recovery from organic wastes and industrial wastewaters. *RSC Advances*, **2** (4), 1248–1263 (2012). DOI: 10.1039/C1RA00839K

- Li X., Abu-Reesh I. M., and He Z. Development of bioelectrochemical systems to promote sustainable agriculture. *Agriculture*, **5** (3), 367–388 (2015). DOI: 10.3390/agriculture5030367
- Strik D. P., Hamelers H. V. M., Snel J. F., and Buisman C. J. Green electricity production with living plants and bacteria in a fuel cell. *Int. J. Energy Res.*, **32** (9), 870–876 (2008). DOI: 10.1002/er.1397
- Gul M. M. and Ahmad K. S. Bioelectrochemical systems: sustainable bio-energy powerhouses. *Biosensors and Bioelectronics*, **142**, 111576 (2019). DOI: 10.1016/j.bios.2019.111576
- Wang S., Adekunle A., and Raghavan V. Exploring the integration of bioelectrochemical systems and hydroponics: Possibilities, challenges, and innovations, *J. Cleaner Prod.*, **366**, 132855 (2022). DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132855
- Yan X., Wang Z., Huang L., Wang C., Hou R., Xu Z., and Qiao X. Research progress on electrical signals in

- higher plants, *Progr. Natural Sci.* **19** (5), 531 (2009). DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.08.009
9. Dziubinska H., Trebacz K., and Zawadski T. The effect of excitation on the rate of respiration in the liverwort *Conocephalum conicum*. *Physiologia Plantarum*, **75**, 417–423 (1989). DOI:10.1111/J.1399-3054.1989.TB04648.X
 10. Davies E., Zawadzki T., and Witters D. Electrical activity and signal transmission in plants: how do plants know. In: *Plant signaling, plasma membrane and change of state*, Ed. by C. Penel and H. Greppin (University of Geneva Press, Geneva, Switzerland), pp. 119–137 (1991).
 11. Pickard B. G. Action potentials in higher plants. *Botan. Rev.*, **39**, 172–201 (1973).
 12. Maffei M. and Bossi S. Electrophysiology and plant responses to biotic stress. In: *Plant electrophysiology: theory and methods*, Ed. by A. G. Volkov (Springer, Berlin, Heidelberg, 2006), pp. 461–481. DOI: 10.1007/978-3-540-37843-3_20
 13. Медведев С. С. *Электрофизиология растений* (Изд-во СПбГУ., СПб., 1998).
 14. Опритов В. А. Проблемы и перспективы изучения биоэлектrogenеза у высших растений. *Вестн. Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского* (Материалы выездной сессии ОФР РАН по проблемам биоэлектrogenеза и адаптации у растений (2000 г.), б/н, 7–10 (2001).
 15. Пятагин С. С. Распространяющиеся электрические сигналы в растениях. *Цитология*, **50** (2), 154–159 (2008).
 16. Опритов В. А., Пятагин С. С. и Ретивин В. Г. *Биоэлектrogenез у высших растений* (Наука, М., 1991).
 17. Tazawa M. and Shimmen T. How characean cells have contributed to the progress of plant membrane biophysics. *Functional Plant Biol.*, **28** (7), 523–529 (2001). DOI: 10.1071/PP01027
 18. Fromm J. and Spanswick R. Characteristics of action potentials in willow (*Salix viminalis* L.). *J. Exp. Botany*, **44** (7), 1119–1125 (1993). DOI: 10.1093/jxb/44.7.1119
 19. Пятагин С. С., Воденев В. А. и Опритов В. А. Сопряжение генерации потенциала действия в клетках растений с метаболизмом: современное понимание проблемы. *Успехи соврем. биологии*, **125** (5), 520–528 (2005).
 20. Oyarce P. and Gurovich L. Electrical signals in avocado trees: Responses to light and water availability conditions. *Plant Signaling & Behavior*, **5** (1), 34–41 (2010). DOI: 10.4161/psb.5.1.10157
 21. Volkov A. G., Dunkley T. C., Morgan S. A., Ruff II D., Boyce Y. L., and Labady A. J. Bioelectrochemical signaling in green plants induced by photosensory systems. *Bioelectrochemistry*, **63** (1–2), 91–94 (2004). DOI: 10.1016/j.bioelechem.2003.09.025
 22. Bentrup F.-W. Cellular polarity. In *Cellular Interactions*, Ed. by H. F. Linskens and J. Heslop-Harrison (Springer-Verlag, Berlin, 1984), pp. 473–490.
 23. Kabutey F. T., Zhao Q., Wei L., Ding J., Antwi P., Quashie F. K., and Wang W. An overview of plant microbial fuel cells (PMFCs): Configurations and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **110**, 402–414 (2019). DOI: 10.1016/j.rser.2019.05.016
 24. Choudhury P., Prasad Uday U. S., Bandyopadhyay T. K., Ray R. N., and Bhunia B. Performance improvement of microbial fuel cell (MFC) using suitable electrode and Bioengineered organisms: A review. *Bioengineered*, **8** (5), 471–487 (2017). DOI: 10.1080/21655979.2016.1267883
 25. Sarma P. J. and Mohanty K. *Epipremnum aureum* and *Dracaena braunii* as indoor plants for enhanced bioelectricity generation in a plant microbial fuel cell with electrochemically modified carbon fiber brush anode. *J. Biosci. Bioeng.*, **126**, 404–410 (2018). DOI: 10.1016/j.jbiosc.2018.03.009
 26. Regmi R., Nitorisravut R., and Ketchaimongkol J. A decade of plant-assisted microbial fuel cells: looking back and moving forward. *Biofuels*, **9**, 605–612 (2018). DOI: 10.1080/17597269.2018.1432272
 27. Kaku N., Yonezawa N., Kodama Y., and Watanabe K. Plant/microbe cooperation for electricity generation in a rice paddy field. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **79**, 43–49 (2008). DOI: 10.1007/s00253-008-1410-9
 28. Sudirjo E., Buisman C. J., and Strik D. P. Activated carbon mixed with marine sediment is suitable as bioanode material for *Spartina anglica* sediment/plant microbial fuel cell: plant growth, electricity generation, and spatial microbial community diversity. *Water*, **11** (9), 1810 (2019). DOI: 10.3390/w11091810
 29. Apollon W., Kamaraj S. K., Silos-Espino H., Perales-Segovia C., Valera-Montero L. L., Maldonado-Ruelas V. A., Vazquez-Gutierrez M. A., Ortiz-Medina R. A., Flores-Benitez S., and Gomez-Leyva J. F. Impact of *Opuntia* species plant bio-battery in a semi-arid environment: demonstration of their applications. *Appl. Energy*, **279**, 115788 (2020). DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.115788
 30. Schievano A., Colombo A., Grattieri M., Trasatti S. P., Liberale A., Tremolada P., Pino C., and Cristiani P. Floating microbial fuel cells as energy harvesters for signal transmission from natural water bodies. *J. Power Sources*, **340**, 80–88 (2017). DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.11.037
 31. Osorio-de-la-Rosa E., Vazquez-Castillo J., Castillo-Atoche A., Heredia-Lozano J., Castillo-Atoche A., Becerra-Nuñez G., and Barbosa, R. Arrays of plant microbial fuel cells for implementing self-sustainable wireless sensor networks. *IEEE Sensors J.*, **21** (2), 1965–1974 (2021). DOI: 10.1109/JSEN.2020.3019986
 32. Jung S., Lee J., Park Y. K., and Kwon E. E. Bioelectrochemical systems for a circular bioeconomy. *Bioresour. Technol.*, **300**, 122748 (2020). DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122748
 33. Панова Г. Г., Удалова О. Р., Канаш Е. В., Галушко А. С., Кочетов А. А., Прияткин Н. С., Архипов М. В. и Черноусов И. Н. Основы физического моделирования «идеальных» агроэкосистем. *Журн. техн. физики*, **90** (10), 1633–1639 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.10.49792.429-19

34. Кулешова Т. Э., Бушлякова А. В. и Галль Н. Р. Неинвазивное измерение биоэлектрических потенциалов растений. *Письма в Журн. техн. физики*, **45** (5), 6–8 (2019). DOI: 10.21883/PJTF.2019.05.47387.17541
35. Чесноков Ю. В., Канаш Е. В., Мирская Г. В., Кочерина Н. В., Русаков Д. В., Ловассер У. и Бёрнер А. Картирование QTL индексов диффузного отражения листьев яровой гексаплоидной пшеницы (*Triticum aestivum* L.). *Физиология растений*, **66** (1), 46–57 (2019).
36. *MINI-РАМ-II. Руководство по автономному использованию, Edition 3* (Heinz Walz GmbH, 2018).
37. Кулешова Т. Э., Панова Г. Г., Галль Н. Р. и Галушко А. С. Концентрационный элемент на основе электрогенных процессов в корнеобитаемой среде. *Письма в Журн. техн. физики*, **48** (8), 29–32 (2022). DOI: 10.21883/PJTF.2022.08.52363.19066
38. Кулешова Т. Э., Галль Н. Р., Удалова О. Р. и Панова Г. Г. Многофункциональный комплекс датчиков для фитомониторинга в условиях интенсивной светокультуры. *Агрофизика*, **4**, 33–39 (2020). DOI: 10.25695/AGRPH.2020.04.06
39. Kovinich N., Kayanja G., Chanoca A., Riedl K., Otegui M. S., and Grotewold E. Not all anthocyanins are born equal: distinct patterns induced by stress in Arabidopsis. *Planta*, **240**, 931–940 (2014). DOI: 10.1007/s00425-014-2079-1
40. *Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов*. СанПиН 2.3.2.1078-01", 06.11.2001.

Electrogenesis in the Root Environment of Various Lettuce Varieties

T.E. Kuleshova*, Z.A. Gasieva*, D.V. Rusakov*, A.S. Galushko*, and G.G. Panova*

*Agrophysical Research Institute, Grazhdanskiy prosp. 14, Saint-Petersburg, 195220 Russia

Bioelectrochemical systems based on electroactive processes in the root environment of plants are a promising direction for the combined production of green electricity and plant products. This work aimed to investigate the dynamics of the potential differences formation in the root environment, diffuse reflectance indices of leaves, fluorescence parameters, morphometric and biochemical characteristics of the lettuce varieties (Chinese curly, Chinese red-green, Ballet, Cockarde, Mercury, Dubrava, Robin) and Solos F1 hybrid. A maximum potential difference of 430 mV was observed for the Mercury variety, and a minimum potential difference of 352 mV was determined for the Chinese curly variety. Analysis of measurements taken including morphometric, biochemical and photosynthetic characteristics in addition to electrical parameters revealed that the Ballet lettuce variety showed the best parameters among other lettuce varieties under study. It is evident based on the data obtained that it is possible to create agrophytocenoses that include plants capable of high and stable electricity generation along with high productivity and good quality of the resulting plant products due to the effective absorption and conversion of light energy.

Keywords: bioelectrochemical system, plant-microbial fuel cell, artificial light culture, activity of the photosynthetic apparatus, plant products