



Последовательное соединение биоэлектрохимических систем, основанных на электрогенных процессах в корнеобитаемой среде салата

Т.Э. Кулешова¹, З.А. Гасиева¹

Отдел Светофизиологии растений и биопродуктивности агроэкосистем
ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт» (ФГБНУ АФИ)
эл. почта: kuleshova@agrophys.ru



Содержание научного сообщения

- 1. Актуальность и историческая справка
- 2. Научно-технические основы разрабатываемой биоэлектрохимической системы
- 3. Электрические параметры системы корнеобитаемая среда-растения
- 4. Соединение биоэлектрохимических систем и масштабирование
- 5. Возможности применения биоэлектрохимических систем

1. Актуальность

Проблема: истощение запасов углеводородного топлива, загрязнение атмосферы



Возможное решение: создание **БИОЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ (БЭС)** – устройств, в основе которых лежит способность живых организмов преобразовывать химическую энергию в электрическую.

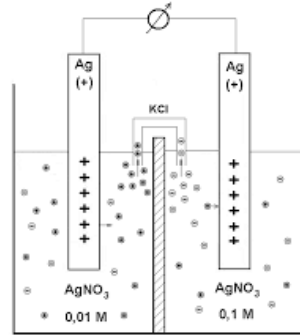


Развитие представлений об электрогенезе живых систем

ГОДЫ

1791—97

Л. Гальвани, А. Вольта открытие «животного электричества», создание гальванического элемента



Идея: использование различия концентраций для превращения энергии окислительно-восстановительных реакций в электричество (концентрационный гальванический элемент)

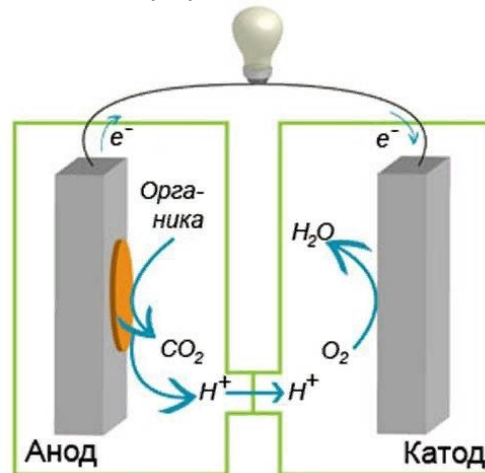
Ограничение: выравнивание концентраций со временем

1837 – н.в.

К. Маттеуччи, Ю. Бернштейн, Н.Е. Введенский, В. Эйнтховен, А. Ф. Самойлов, А. Ходжкин, А. Хаксли и др. исследование биоэлектрических потенциалов

1931

Б. Коэн создание микробного топливного элемента

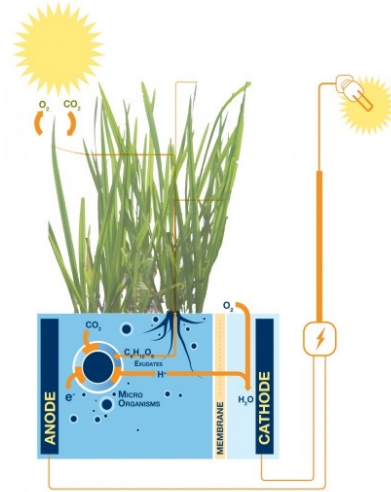


Идея: преобразование энергии химических связей органических веществ в электричество посредством микроорганизмов

Ограничение: нужно вносить субстрат для питания электроактивных бактерий

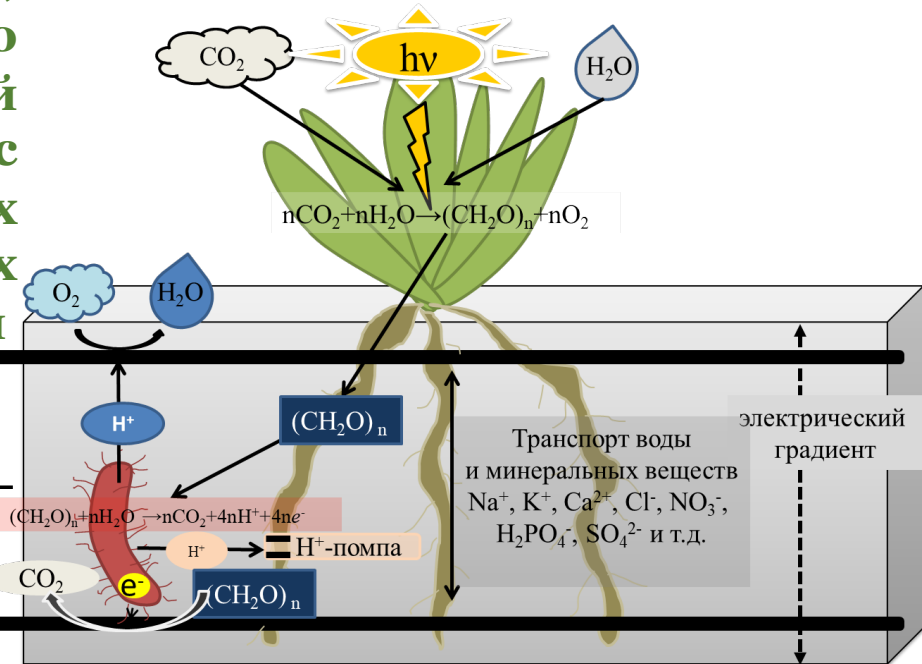
Д. Стрик разработка растительно-микробного топливного элемента

2008

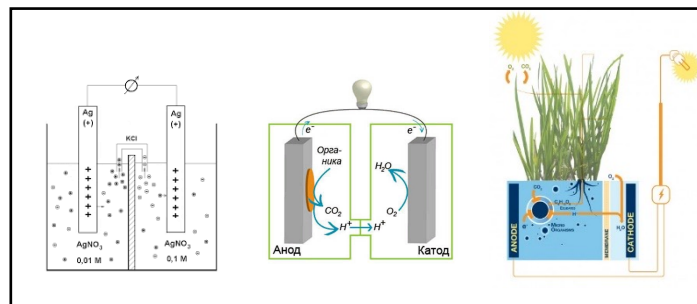


Идея: использование для питания бактерий ризодепозитов – фотосинтезированного органического вещества выделяемого корнями
 Ограничение: не используется весь энергоресурс корнеобитаемой среды

Наша идея: объединение процессов, использование градиента электрического потенциала, создаваемого корневой системой растений и связанного с транспортом ионов и минеральных веществ, и электроактивных растительно-микробных взаимодействий



наши дни



2. Научно-технические основы разрабатываемой биоэлектрохимической системы

- Конструкция
- Процессы

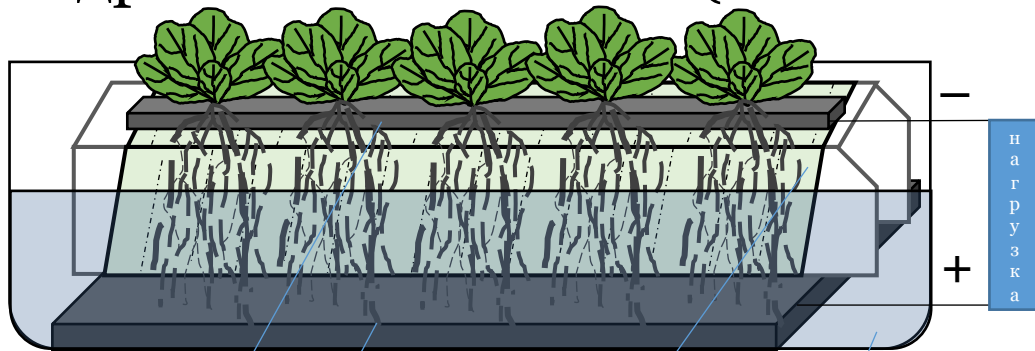


Биоэлектрический потенциал

- ¶ Биоэлектрический потенциал - разность потенциалов между двумя точками ткани, отражающая биоэлектрическую активность и характер протекания метаболических процессов.
- ¶ Предположительно, в основе электрогенных процессов в корнеобитаемой среде и генерации биопотенциала могут лежать возникающие в результате транспорта ионов концентрационные эффекты, потенциалобразующая роль которых ранее не рассматривалась.
- ¶ Для регистрации биопотенциалов, формируемых в корнеобитаемой среде, в системы для выращивания устанавливаются электродные системы, обеспечивающие поверхностный контакт с корневой системой.



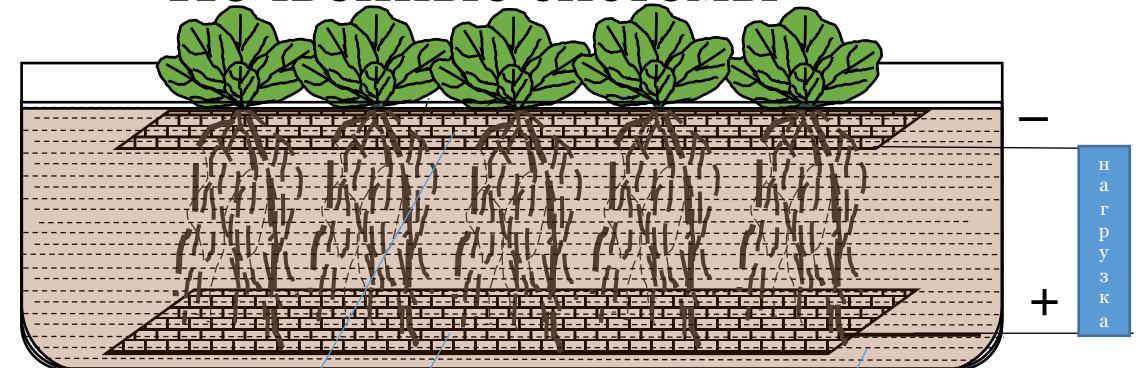
Гидропонные системы (панопоника)



Биосовместимые
коррозионостойкие электроды из
графитового войлока

Тонкослойный почвозаменитель
Питательный раствор

Почвенные системы

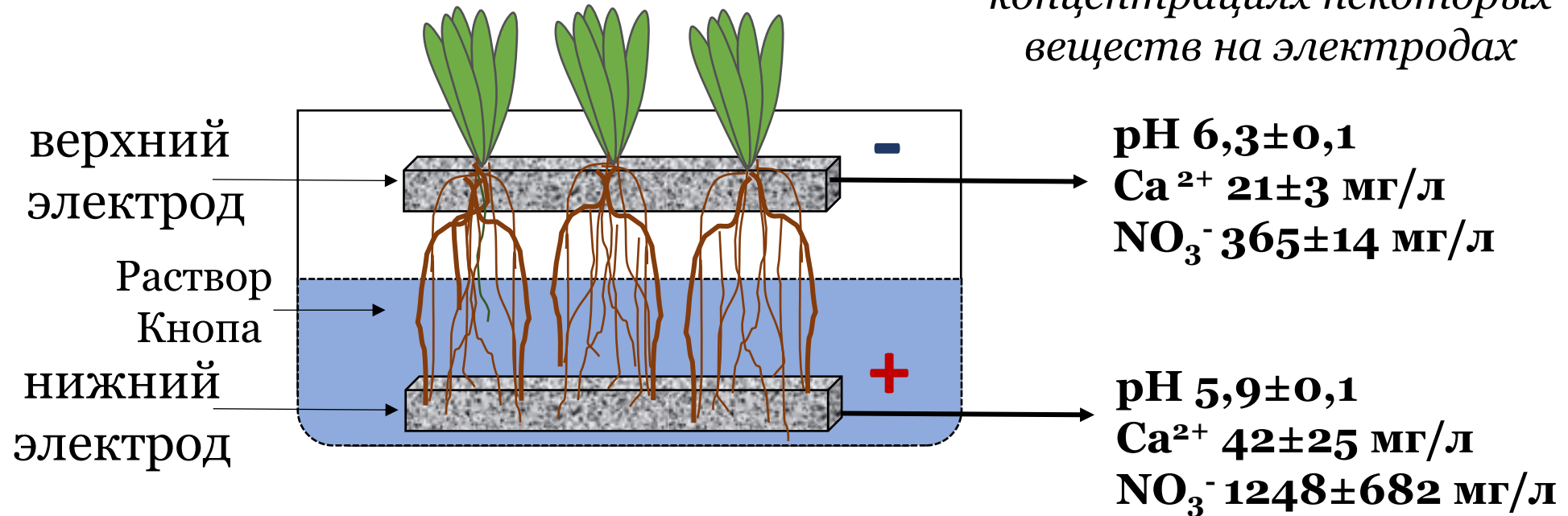


Электроды (нержавеющая
сталь) с порами для
прораствания

Почва

Градиент концентраций ионов вдоль корней

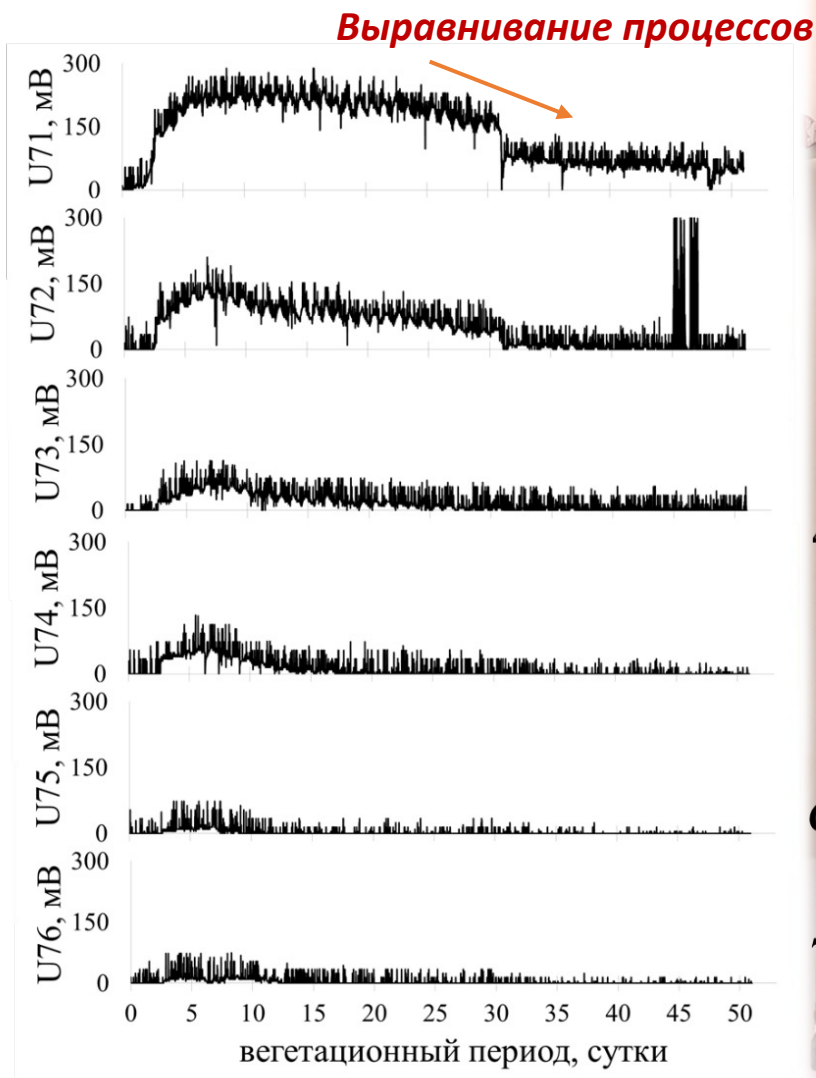
Экспериментально измеренные различия в концентрациях некоторых веществ на электродах



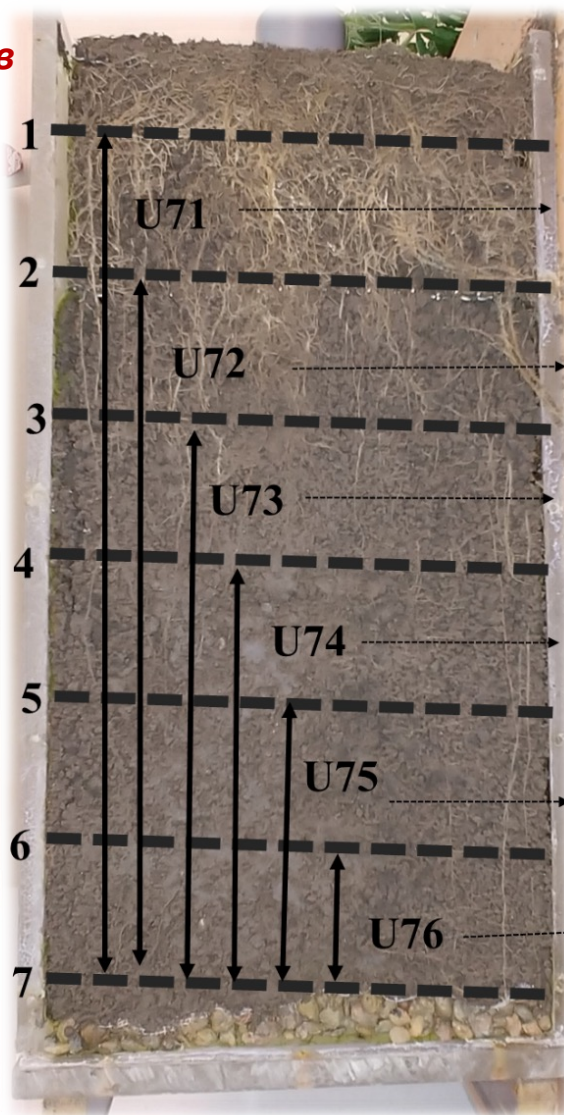
ЭДС – окислительно-восстановительные реакции в корнеобитаемой среде, диффузия ионов, транспорт минеральных веществ корневой системой, градиент концентраций элементов вдоль корней

Динамика разности потенциалов по градиенту глубины

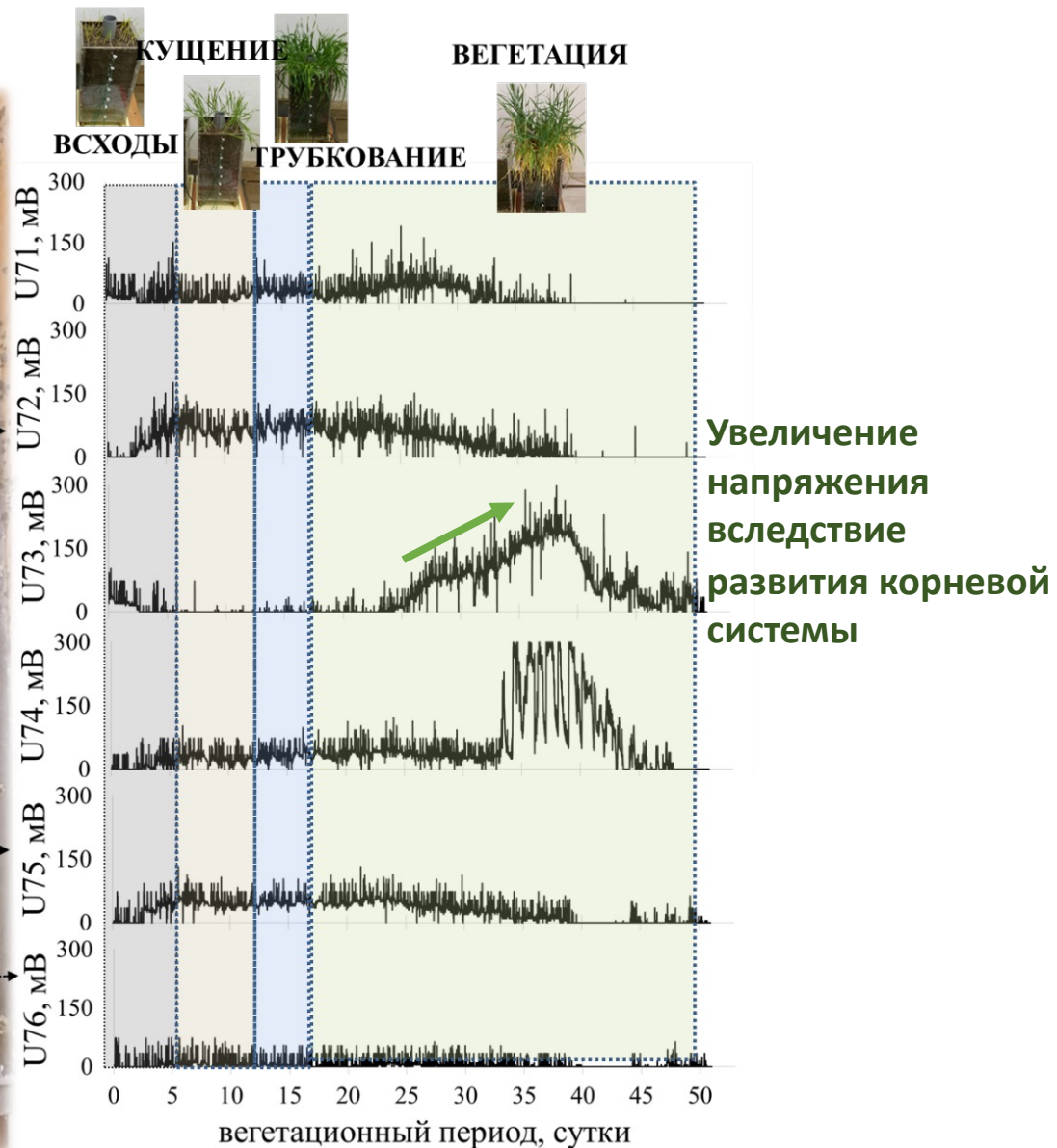
А СОСУД №1 (КОНТРОЛЬ)



Б ВИД СОСУДА И РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ



В СОСУД №2 И СТАДИИ ВЕГЕТАЦИИ



3. Электрические параметры системы корнеобитаемая среда-растения

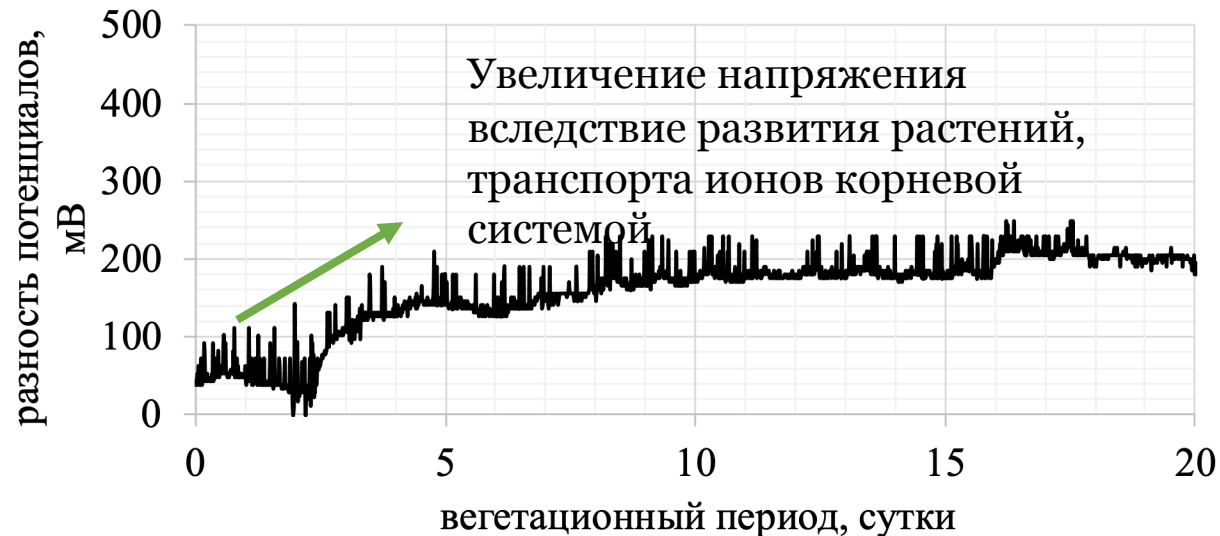
- Роль растения?
- Генетически обусловленный потенциал?
- Связь с биомассой?



Разность потенциалов в корнеобитаемой среде

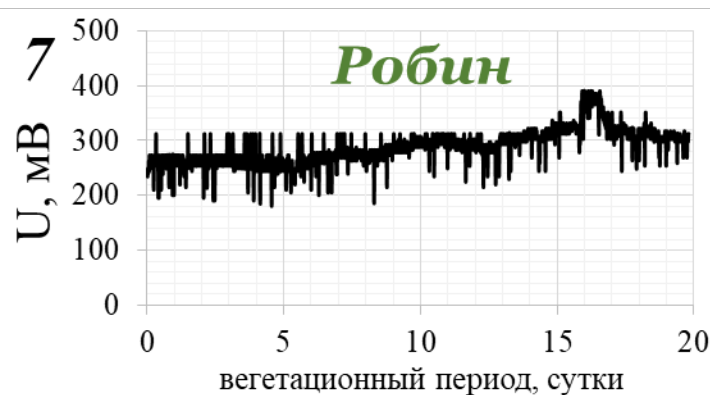
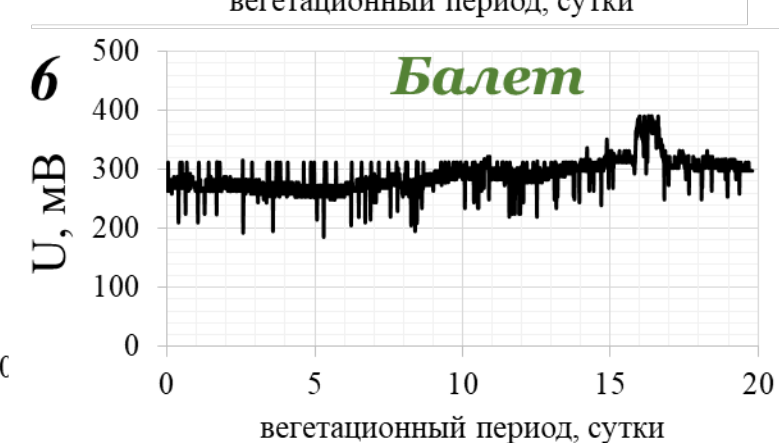
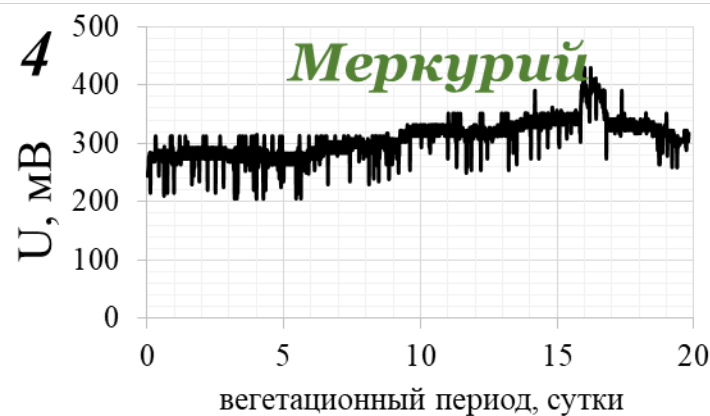
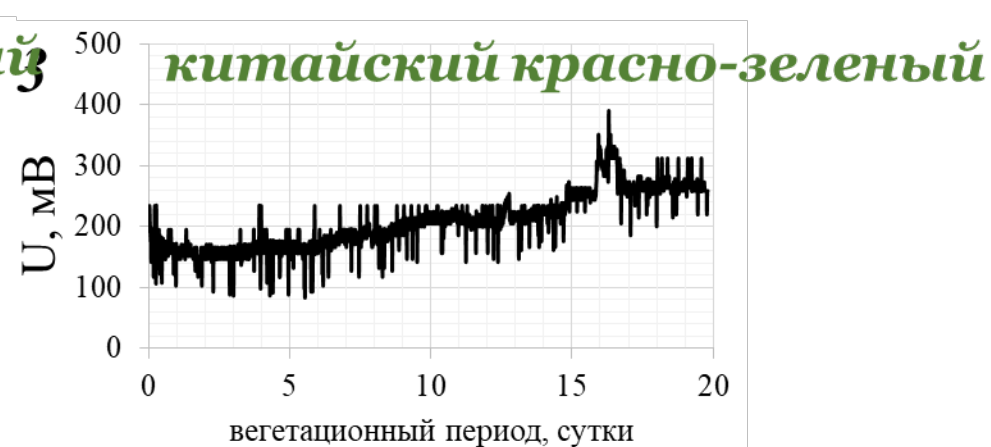
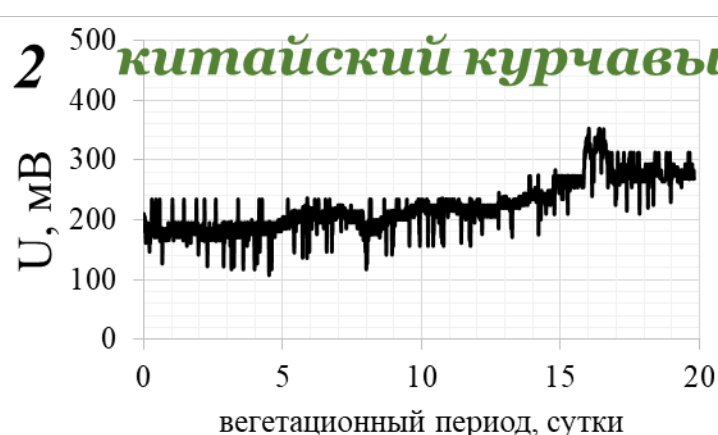
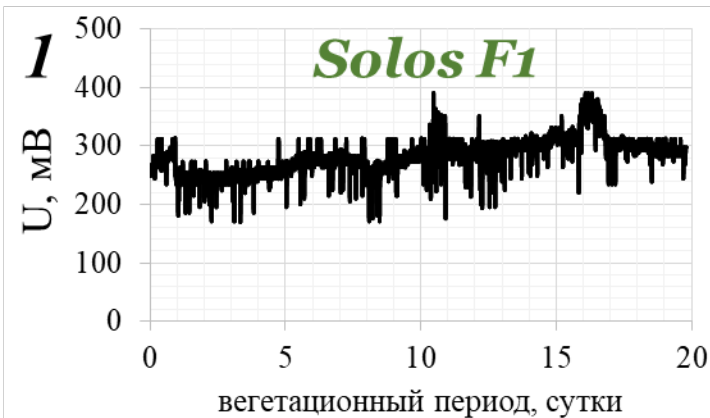


Система культивирования без растений



Культивирование салата методом панопоники

Динамика биоэлектрических потенциалов для различных сортов салата



Рейтинг по величине напряжения

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)**



1 – Solos, 2 – Китайский курчавый, 3 – Китайский красно-зеленый, 4 – Меркурий, 5 – Дубрава, 6 – Балет, 7 – Робин, 8 – Кокарда

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

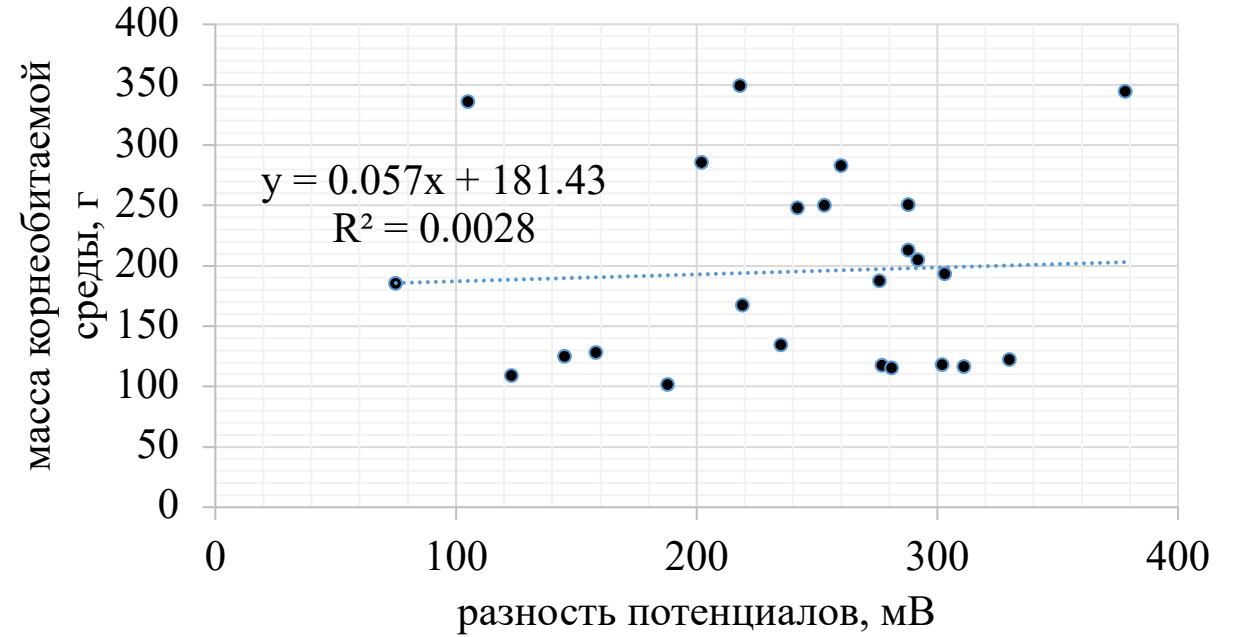
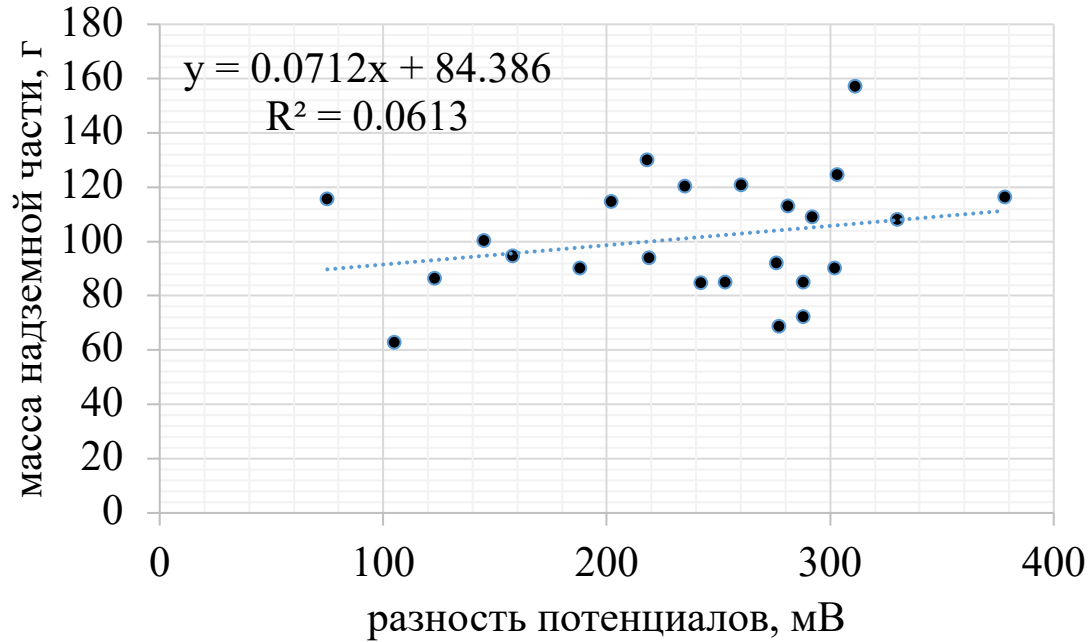
Сорт салата	Среднее U, мВ	Максимальное U, мВ	Масса надземной части растений в одной ячейки, г	Высота растений, см
Solos F1	281±32 ^a	391	47,8±6,6 ^{ef}	19,7±1,0 ^d
Китайский курчавый	221±42 ^b	352	48,1±7,5 ^{ef}	23,1±2,0 ^c
Китайский красно-зеленый	206±47 ^b	391	58,0±6,3 ^d	29,9±2,2 ^b
Меркурий	306±32 ^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



По выходу растительной продукции :
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 f1 **Solos** (47,8 г) ≥ **сорт Дубрава (42,6 г).**

Примечание: данные с одинаковыми буквами (a-f) по столбцам статистически не различаются при $p \leq 0,05$ (критерий Дункана).

Биомасса и генерация биопотенциалов



Масса растения 46 г
Масса корнеобитаемой среды 116 г
Напряжение 311 мВ



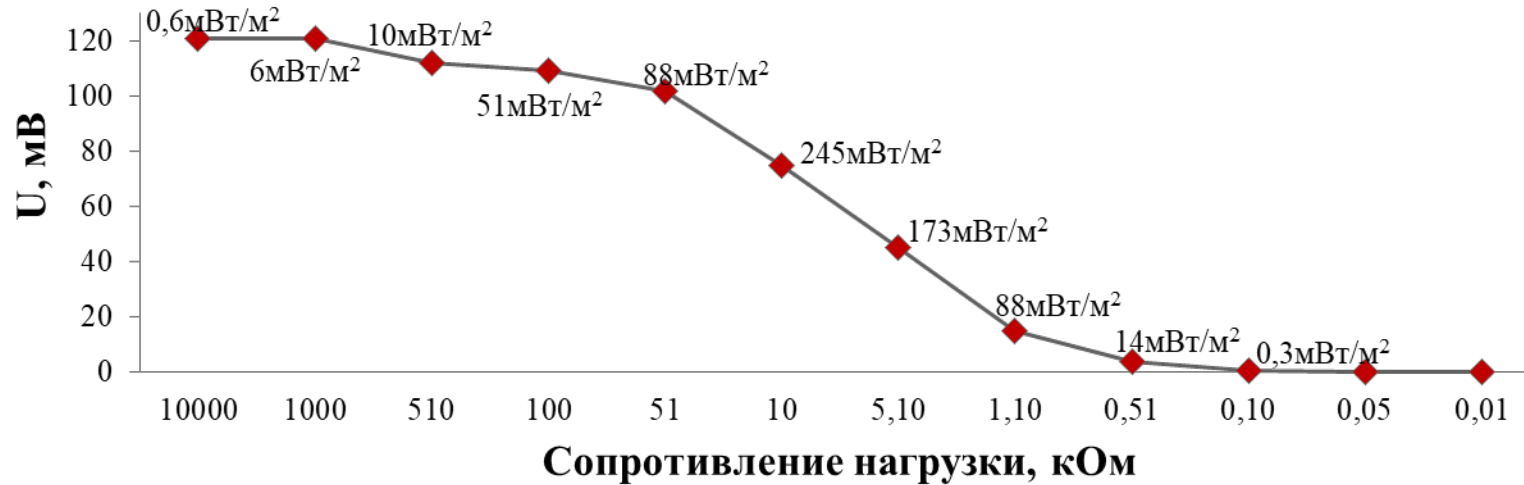
Масса растения 12 г
Масса корнеобитаемой среды 271 г
Напряжение 864 мВ

4. Соединение биоэлектрохимических систем и масштабирование

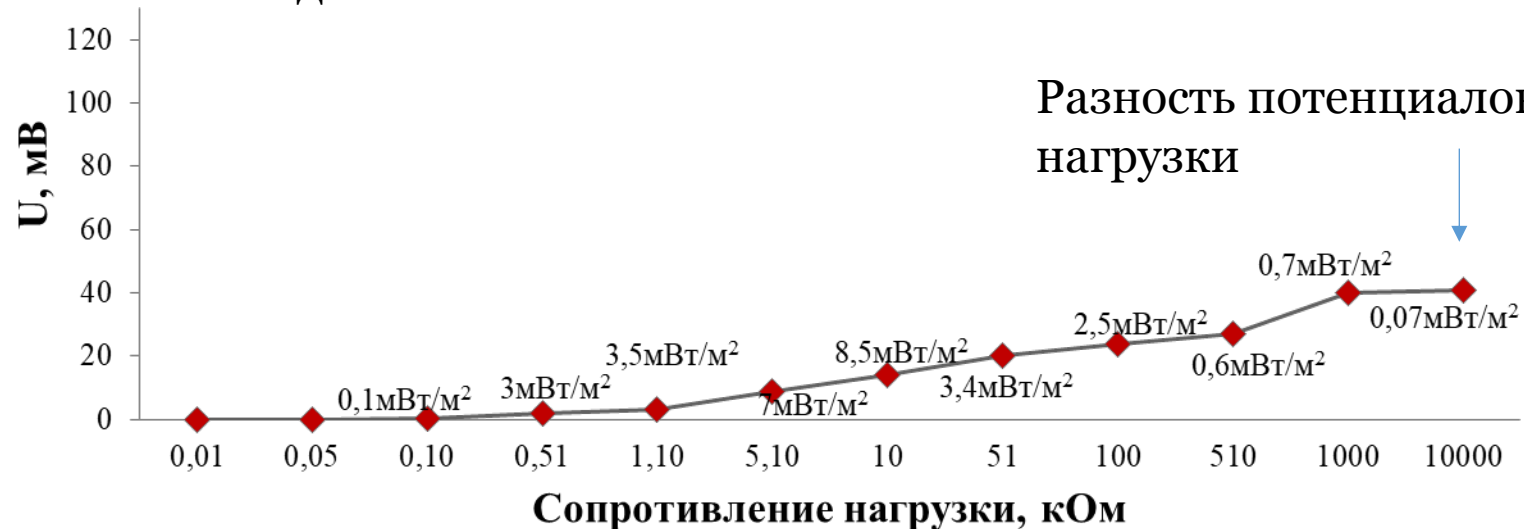


Нагрузочные характеристики

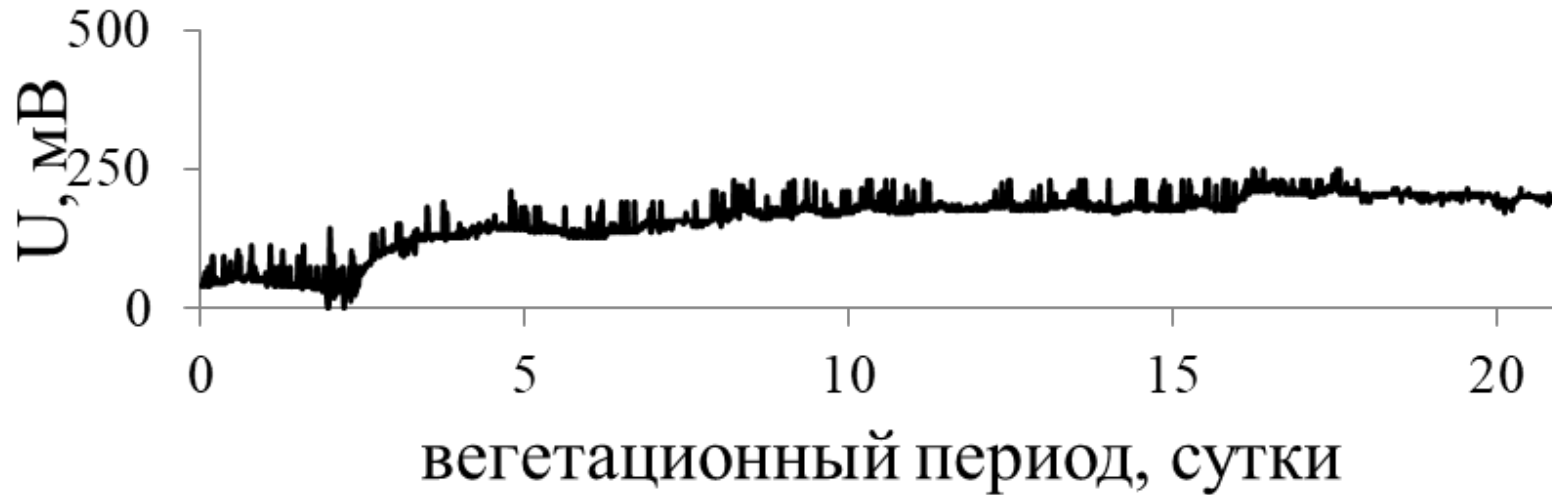
Величина разности потенциалов в корнеобитаемой среде в зависимости от сопротивления подключаемой нагрузки.



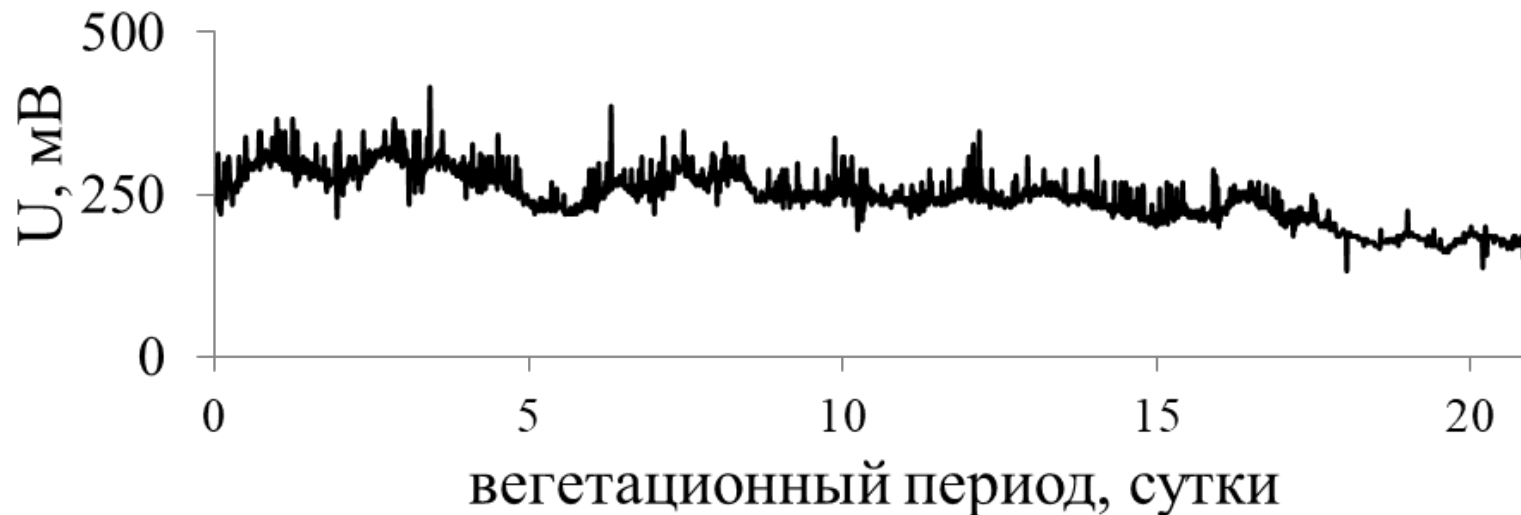
При подключении к системе нагрузки <10 кОм биопотенциал значительно падает и восстанавливается лишь в течении нескольких часов. Это говорит об ограниченных возможностях отвода тока от растения без внесения изменений в их жизнедеятельность.



Последовательное соединение 3 ячеек

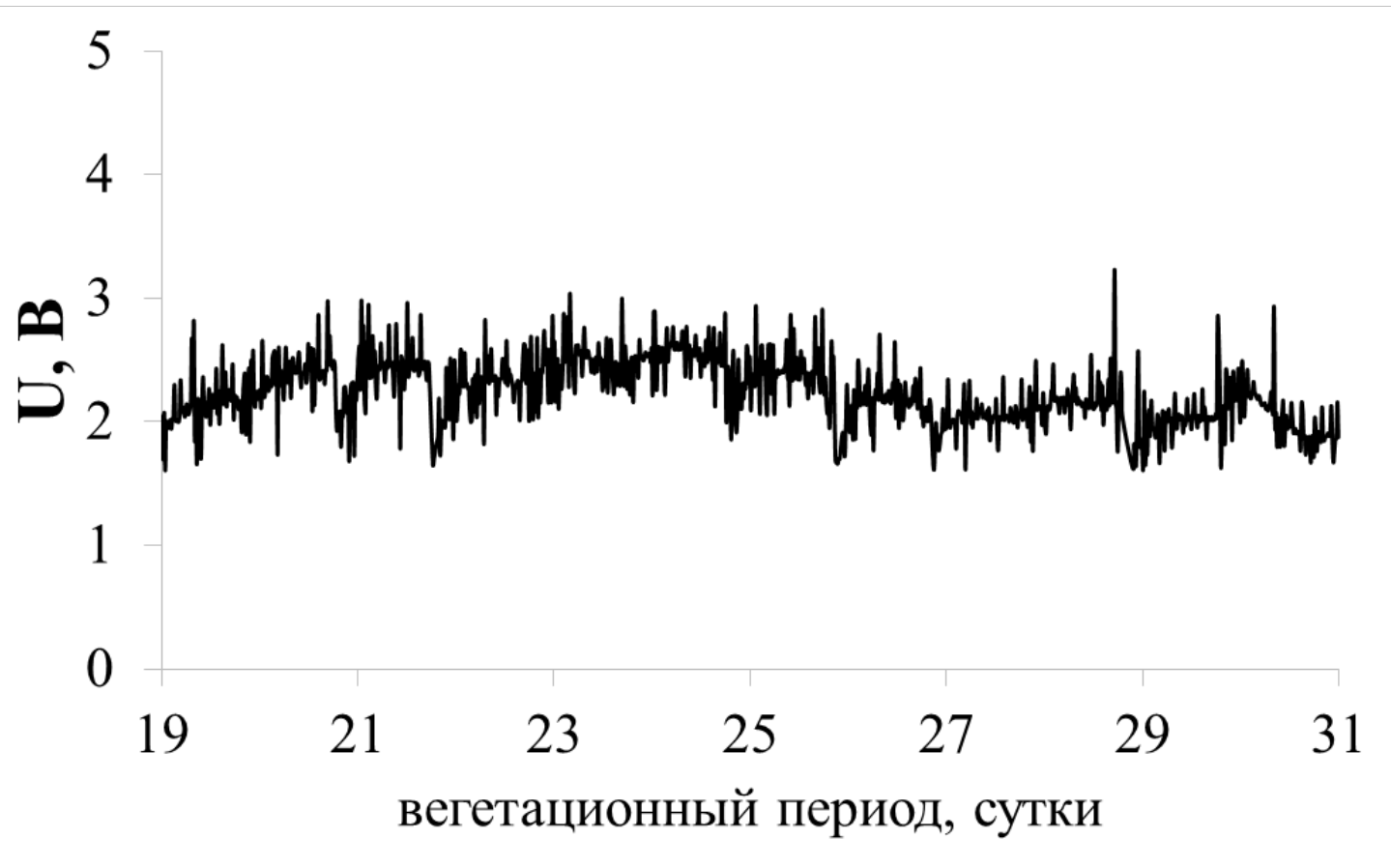


Одна ячейка
U среднее **160** мВ,
макс **249** мВ



Последовательное
соединение 3 ячеек
U среднее ~~480~~ **244** мВ,
макс **415** мВ

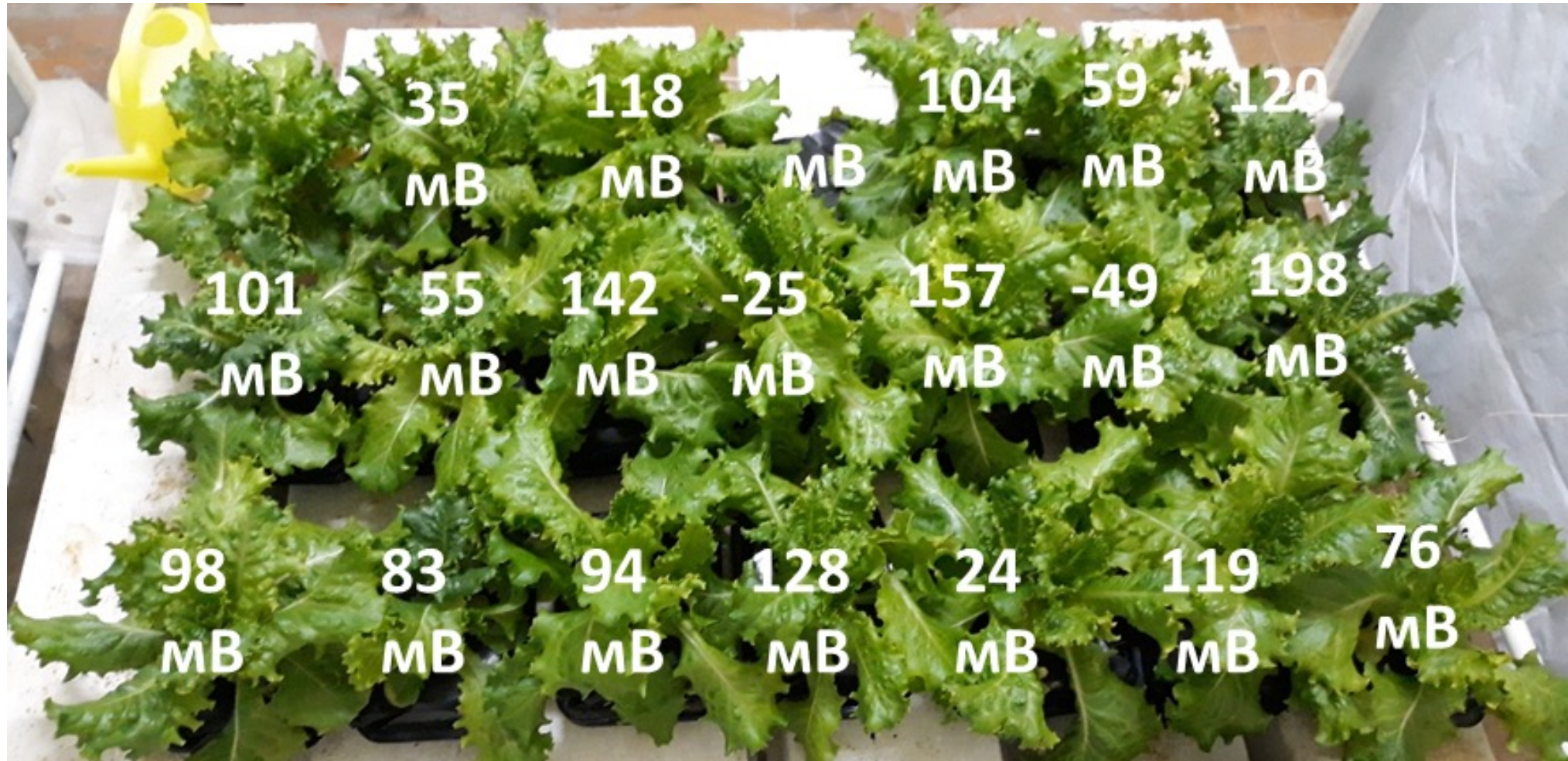
Последовательное соединение 20 ячеек



Последовательное
соединение 20 ячеек
U среднее ~~3,2~~ 2,2 В,
макс **3,2 В**

Масштабирование

Разность потенциалов отдельных ячеек при их последовательном соединении



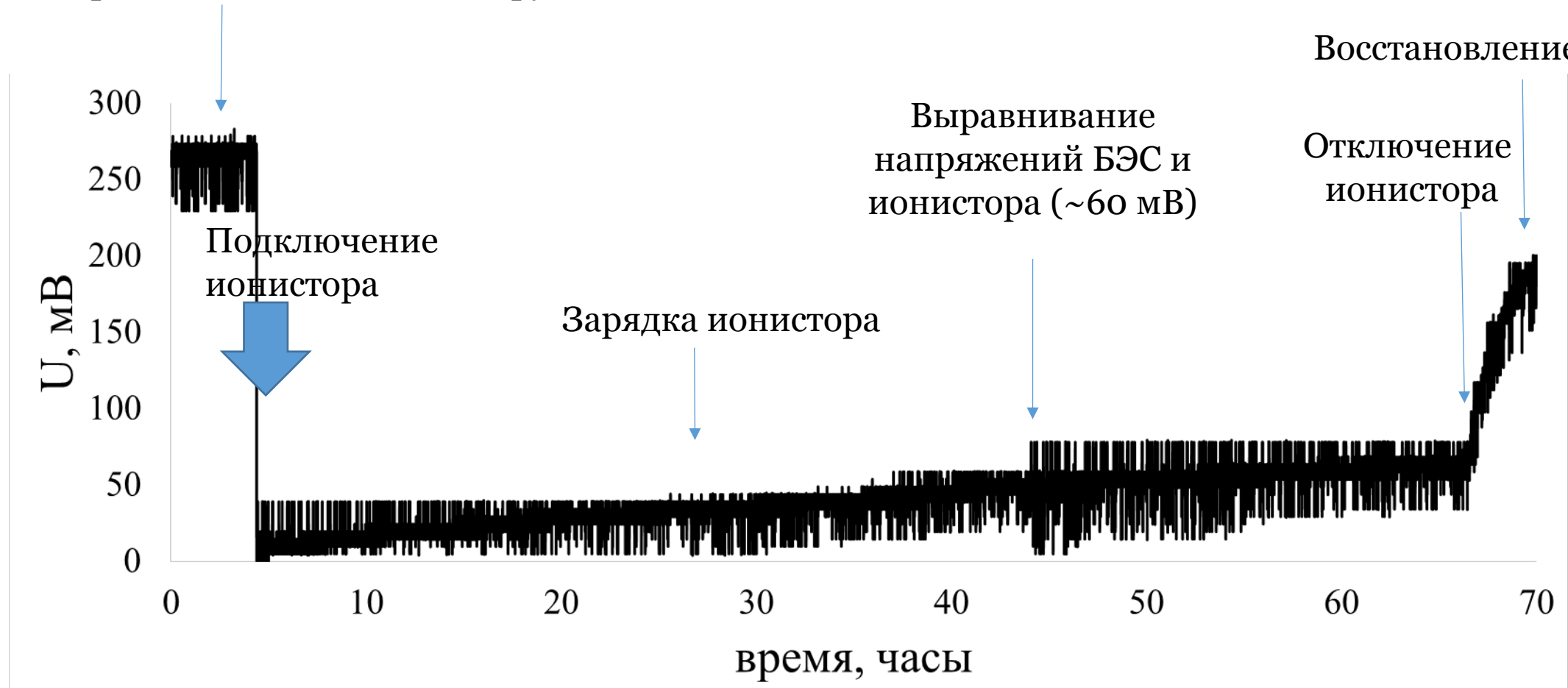
Вероятно, такие различия связаны как с влиянием на физиологическое состояние растительных организмов – протекание тока через соединенные ячейки влияет на электрогенные свойства системы, так и с неравномерностью зарядки при неоднородных элементах, входящих в батарею – при включении в цепь, более емкие элементы недоразряжаются, а менее емкие переразряжаются.

Возможность накопления энергии

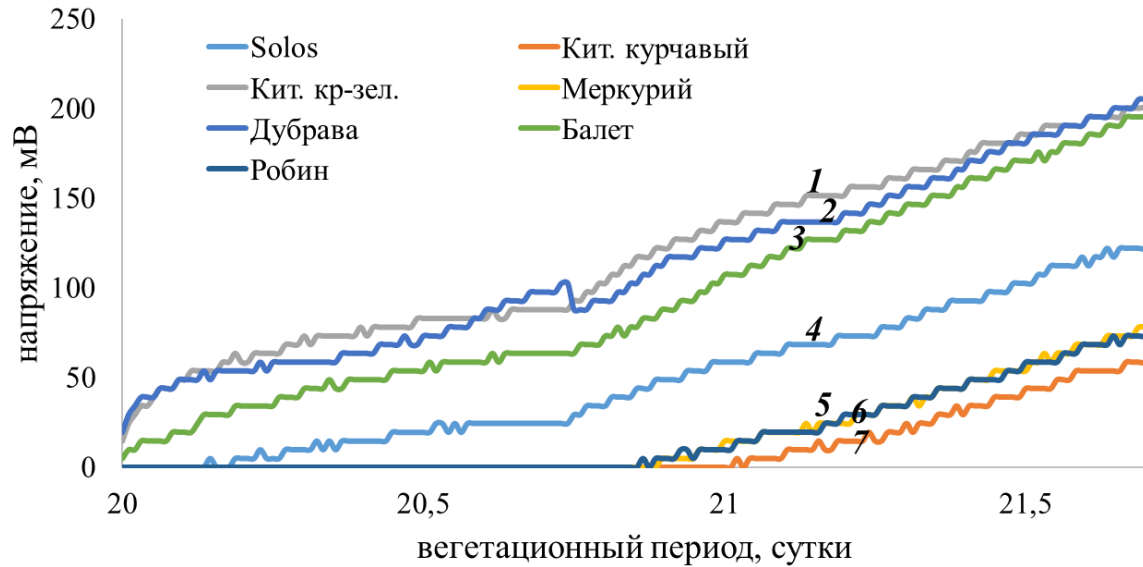


Динамика зарядки ионистора (0,1 Ф) от БЭС

Напряжение в ячейке без нагрузки



Зарядка ионистора от биоэлектрoхимических систем на основе различных сортов салата



Динамика зарядки ионистора емкостью 0,1 Ф от биоэлектрoхимических систем на основе различных салатов:

1 – Китайский красно-зеленый, 2 – Дубрава, 3 – Балет, 4 – F₁ Solos, 5 – Робин, 6 – Меркурий, 7 – Китайский курчавый.

По накопленной на ионисторе (или отданной растениями) энергии через 40 часов зарядки, в пересчете на м² зоны роста в биоэлектрoхимической 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 в час, то есть скорость зарядки, в период с 21 по 22 день вегетационного периода составило:

сорт **Балет** (5,3 В/ч) ≥ сорт **Дубрава** (5,0 В/ч) > сорт **Меркурий** (4,3 В/ч) > сорт **Китайский красно-зеленый** (3,9 В/ч) = гибрид F₁ **Solos** (3,9 В/ч) = сорт **Робин** (3,9 В/ч) ≥ сорт **Китайский курчавый** (3,5 В/ч).

5. Возможности применения биоэлектрохимических систем



Применение



*в условиях
защищенного грунта*



Частичное
обеспечение
жизнедеятельности
растений



*в естественных
условиях*



Питание светодиодов,
подсвечивание дорожек,
зарядка электрических
устройств и т.д.

Снабжение электропитанием маломощных датчиков:

*параметров
окружающей
среды*

*фитомониторинга
(состояния растений)*

*сигнализации
и др...*

*Электропитание часов и светодиода
от биобатареи на основе кактуса
(W. Apollon et al., Biomass and Bioenergy 148
(2021) 106028)*



Применение: одновременное получение экологически чистой возобновляемой зеленой энергии и растительного продовольствия при культивировании



«Электростанция ElectroPlant» (АФИ)



Питание светодиода от энергонакопительного модуля (АФИ)

**Спасибо за
внимание!**



Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-4397.2022.5).